



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

STUDIUM MR KAPALINY PRO KOSMICKÉ APLIKACE

THE STUDY OF THE MR FLUID FOR SPACE APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Andrej Macejka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Kubík

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Andrej Macejka**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Michal Kubík**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Studium MR kapaliny pro kosmické aplikace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je studium reologických vlastností magnetoreologické kapaliny v nízkých smykových spádech. Experimenty s MR kapalinou budou probíhat na zařízení RotoVisco, které je dostupné na UK FSI VUT.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Materiál a metody
5. Výsledky
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, laboratorní protokol, digitální data

Typ práce: experimentální

Účel práce: výzkum a vývoj

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2016.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam literatury:

Felt, D.W., Hagenbuchle, M., Liu, J., Richard, J. (1996): Rheology of a Magnetorheological fluid. Journal of intelligent material systems and structures, vol. 7, pp. 589-593, DOI: 10.1177/1045389X9600700522

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá studiem reologických vlastností magnetoreologických (MR) kapalin v neaktivovaném stavu. Cílem téhle práce je určení metodiky měření a vyhodnocení základních reologických vlastností MR kapalin v širokém rozsahu teplot.

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetoreologická kapalina, reologie

ABSTRACT

This bachelor thesis is concerned with study of off-state rheological properties of magnetorheological (MR) fluid. The purpose of this thesis is to define measurement methodology and evaluation inherent rheological properties of MR fluids in wide temperature range.

KEYWORDS

Magnetorheological fluid, rheology

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACEJKA, A. Studium MR kapaliny pro kosmické aplikace. Brno: Vysoké Učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Kubík.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci zpracoval samostatně pod vedením Ing. Michala Kubíka a v seznamu literatury uvedl veškeré zdroje, z nichž jsem čerpal.

V Brně dne

.....

Andrej Macejka

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval Ing. Michalovi Kubíkovi za odborné vedení, cenné připomínky a rady

OBSAH

ÚVOD	11
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	12
1.1 Reologické chování kapalin.....	12
1.1.1 Newtonovské kapaliny	12
1.1.2 Ne-newtonovské kapaliny	12
Základní rozdělení neneutovských kapalin (Obr. 1.2), (Obr. 1.3):.....	13
1.2 Reologické vlastnosti magnetoreologických kapalin	14
1.3 Mez toku MR kapalin	15
1.4 Kapaliny s časově závislou složkou deformace.....	16
1.4.1 Tixotropní chování	16
1.5 Smykově řidnoucí a houstnoucí kapaliny.....	18
1.5.1 Smykově řidnoucí kapaliny (shear thinning) (Obr. 1.9).....	18
1.5.2 Smykově houstnoucí kapaliny (shear thickening) (obr. 1.9).....	18
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	19
3 MATERIÁL A METODY	20
3.1 Experimentální aparatura.....	20
3.2 Metodika stanovení smykového napětí a smykového spádu.....	21
3.3 Metodika měření.....	21
3.3.1 Měření meze toku kapaliny	21
3.3.2 Měření viskozity při různých konstantních smykových spádech (CR test-constant rate test).....	22
3.3.3 Sweep test, určování indexu toku a koeficientu konzistence dle Herschel-Bulkleyho modelu.	22
3.3.4 Sweep test, tixotropní smyčka.....	22
3.4 Vzorky měřených MR kapalin	23
4 VÝSLEDKY	24
4.1 Mez toku Haohua No. 10, No. 11, No. 12.....	24
4.2 CR test	28
4.2.1 CR test Haohua No. 10 2.55.....	28
.....	30
4.2.2 CR test Haohua 3.05 No. 11	31
4.2.3 CR test Haohua 3.55 No. 12	33
4.3 Sweep test, určení indexu toku a koeficientu konzistence	36
4.3.1 Koeficient konzistence a index toku Haohua No. 10 2.55	36
4.3.2 Koeficient konzistence a index toku Haohua No. 11 3.05	37
4.3.3 Koeficient konzistence a index toku Haohua No. 12 3.55	39
4.4 Sweep test, tixotropní smyčka.....	41
4.4.1 Sweep test, tixotropní smyčka, Haohua No. 10 2.55.....	41
4.4.2 Sweep test, tixotropní smyčka, Haohua No. 11 3.05.....	42
4.4.3 Sweep test, tixotropní smyčka, Haohua No. 12 3.55.....	43
5 DISKUZE	44
5.1 Mez toku.....	44
5.2 CR test	44
5.3 Sweep test, index toku a koeficient konzistence	44
5.4 Sweep test, tixotropní smyčka	45
6 ZÁVĚR	46

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	47
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	48
SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	49
SLOVNÍK POJMŮ	51
PŘÍLOHY	52

ÚVOD

Magnetoreologická kapalina (MR) patří do kategorie tzv. *smart materiálů*. Objev MR kapalin je připisán J. Rabinowu v roce 1949 a spájí se s vynálezem magnetické spojky [1]. Je to suspenze složená z feromagnetických ne-koloidních částic velikosti přibližně 0,05-10 μm v nemagnetické nosné kapalině. Když je MR kapalina bez přítomnosti magnetického pole (neaktivovaný stav) chová se podobně jako olej nebo nátěrová hmota. Jedinečnost téhle kapaliny spočívá v tom, že dokáže měnit své reologické vlastnosti v přítomnosti externího magnetického pole, tato modifikace toku se také nazývá *magnetoreologický efekt*. Při aplikaci magnetického pole se částice začnou chovat jako malé magnety a seřazovat se ve směru působení magnetického pole. Se zvyšující intenzitou magnetického pole roste zdánlivá viskozita (mez toku) až se kapalina jeví jako téměř pevná látka podobná gelu [2]. Tahle přeměna je velmi rychlá (v zlomkách milisekund). Když přestane magnetické pole působit kapalina se rychle vrátí do normálu. Tyhle zajímavé vlastnosti ji předurčují k využití v mnoha aplikacích, které vyžadují semi-aktivní kontrolu vibrací a přenosu momentu, jako například tlumiče, spojky, brzdy, ale také pro vysoce přesné leštění nebo jako kapalinové těsnění.

Nejčastěji používané částice v MR kapalině jsou částice nějaké formy železa, např. karbonylového železa, které jsou používány pro své pozitivní vlastnosti. Běžné MR kapaliny jsou vytvořené smícháním vysokého množství (až do 50obj.%) těchto částic s nosnou kapalinou [2]. Jako nosné kapaliny jsou používány minerální a silikonové oleje, polyestery, polyétery, syntetické uhlovodíky atd. Do MR kapaliny jsou dále přidávány různé aditiva pro zlepšení vlastností, jako například zabránění usazování částic a shlukování, redukce tření, opotřebení a prevence oxidace částic.

Zkonstruovat MR zařízení je poměrně náročné a to především pro složité reologické chování MR kapalin. Složité vlastnosti jsou způsobeny heterogenní strukturou a velkým množstvím dostupných komponent pro přípravu MR kapaliny, které mezi sebou rozdílně interagují. Proto je nutno tohle chování co nejlépe popsat a pochopit. V téhle práci se zaměříme na popsání reologických vlastností MR kapalin v neaktivovaném stavu pomocí rotační reometrie.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1.1 Reologické chování kapalin

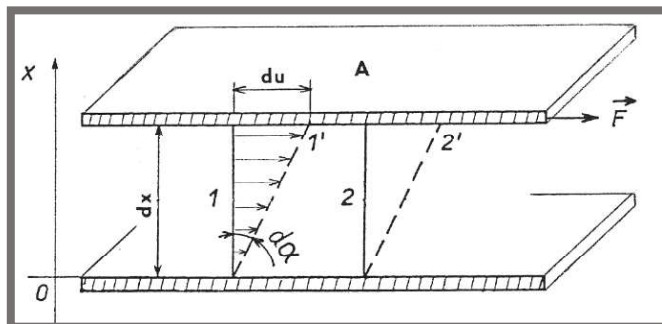
Vědní obor nazývaný reologie se zabývá studiem vnitřní reakce látek (pevných i tekutých) na působení vnějších sil resp. jejich deformovatelností a tokovými vlastnostmi. Tokové vlastnosti kapalin se popisují pomocí základních reologických veličin, viskozity, meze toku a modulů pružnosti. Matematickým vyjádřením tokových vlastností kapalin jsou reologické stavové rovnice, které zpravidla vyjadřují vztah mezi deformačním smykovým napětím τ a deformací kapaliny. Jejich grafickou podobou jsou tokové křivky (reogramy). Kapaliny dělíme na newtonovské a nenewtonovské.

1.1.1 Newtonovské kapaliny

Newtonovské kapaliny jsou lineárně viskózní, to znamená, že napětí je přímo úměrné rychlosti deformace a platí tedy Newtonův zákon viskozity (rovnice 1.1).

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dx} = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1.1)$$

Kde τ [Pa] je smykové napětí, η [Pa.s] je dynamická viskozita, du [m.s⁻¹] je vzájemná rychlost pohybu smykových rovin vzdálených o dx [m] a $\dot{\gamma}$ [s⁻¹] je gradient rychlosti nebo tzv. smykový spád (viz obr. 1.1).



Obr. 1.1 Diagram definice Newtonovho zákona

Příkladem newtonovské kapaliny je například voda.

1.1.2 Ne-newtonovské kapaliny

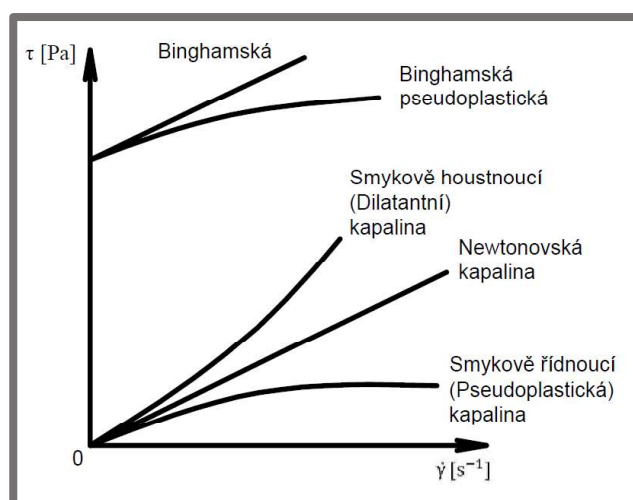
Ne-newtonovské kapaliny jsou nelineárně viskózní, to znamená, že napětí není úměrné rychlosti deformace. Mohou to být různé suspenze, taveniny polymerů, gely. Analogicky platí pro ne-newtonovské kapaliny vztah (rovnice 1.2).

$$\tau = \eta_a(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma} \quad (1.2)$$

Kde η_a [Pa.s] je zdánlivá viskozita, která není látkovou konstantou, ale je funkcí smykového spádu a $\dot{\gamma}$ [s⁻¹] je smykový spád.

Základní rozdělení neneutronovských kapalin (Obr. 1.2), (Obr. 1.3):

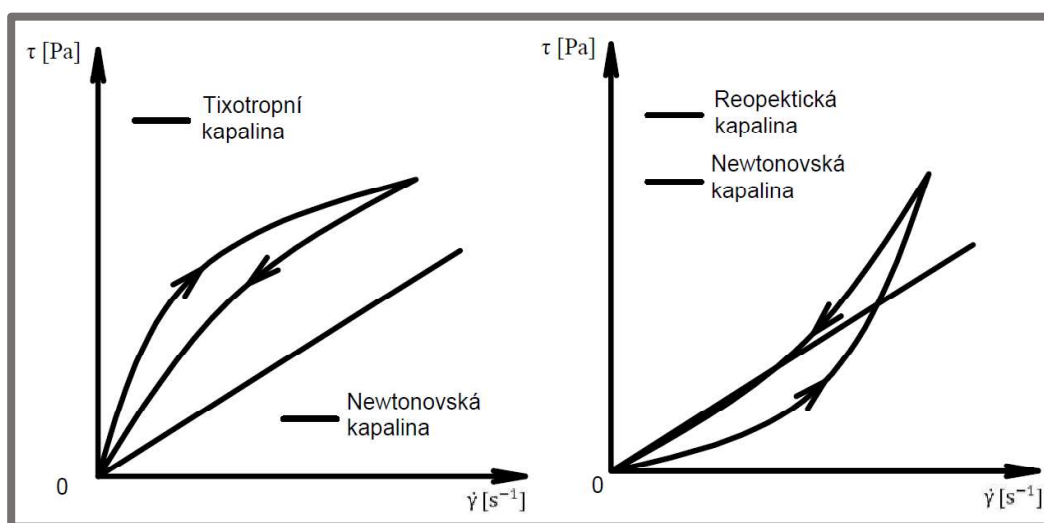
- **Binghamské- tečou** až od určitého kritického napětí (mez toku). Tento materiál se chová jako pevná, elastická látka až do okamžiku když je dosaženo mezní hodnoty napětí, následně teče jako newtonovská kapalina.
- **Binghamské pseudoplastické** – Vykazují mez toku a po její překročení tečou jako kapaliny neneutronovské.
- **Pseudoplastické kapaliny** - Smykově řidnoucí (shear thinning) jsou kapaliny, u nichž viskozita klesá s rostoucím smykovým spádem
- **Dilatantní kapaliny** – Smykově houstnoucí (shear thickening) jsou kapaliny, u nichž viskozita stoupá s rostoucím smykovým spádem



Obr. 1.2 Ne-newtonovské kapaliny [14]

Neneutronovské kapaliny s časovou závislostí (viskoplastické):

- **Tixotropní kapaliny (obr. 1.3 a))** – Jsou speciální případ smykově řidnoucích kapalin, kde s dobou působení napětí viskozita klesá, když je napětí odstraněno viskozita se vrátí po nějaké době zase na původní hodnotu.
- **Reopexní kapaliny (obr. 1.3 b))** – Jsou speciální případ smykově houstnoucích kapalin, kde s dobou působení napětí viskozita roste, když je napětí odstraněno viskozita se vrátí po nějaké době zase na původní

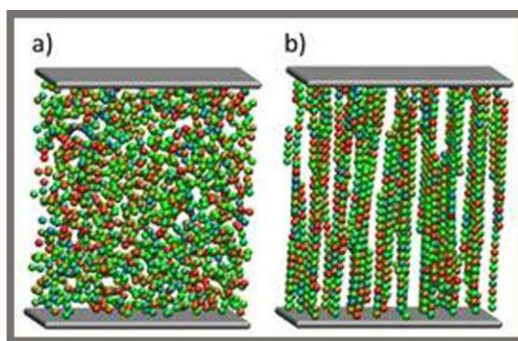


Obr. 1.3 Reogram tixotropní a reopexní kapaliny

1.2 Reologické vlastnosti magnetoreologických kapalin

Když je MR kapalina vystavená magnetickému poli její zdánlivá viskozita výrazně naroste a to $10^5 - 10^6$ násobně v průběhu pár milisekund a výrazně naroste také mez toku [3]. Magnetoreologická odezva je způsobená polarizací částic od externího magnetického pole. Interakce mezi vzniklými dipóly způsobuje, že se částice formují do sloupovitých struktur, paralelních k magnetickému poli (Obr. 1.4). Tyhle řetězovité struktury omezují proudění kapaliny, čím zvyšují viskózní charakter suspenze [4].

Důležitými vlastnostmi těchto magneticky aktivních částic pro dosažení příznivé magnetoreologické odezvy jsou velikost, tvar, hustota, distribuce a velikosti částic, zůstatková magnetizace a nasycení magnetickým polem [3]. Také se experimentuje s různými bidisperzemi magnetických i nemagnetických částic, částic obalených polymerem, nebo s různými tvary částic. Tyhle modifikace mohou vylepšit vlastnosti MR kapaliny. Například přidání nanočástic velikosti desítek nanometrů (< 15 obj. %) způsobí, že se zvýší sedimentační stabilita a zvýší se také mez toku v aktivovaném stavu [5].



Obr. 1.4 a) neaktivovaný stav b) aktivovaný stav [17]

Struktura MR kapalin je anisotropická, to znamená, že mez toku při přítomnosti magnetického pole je závislá na směru působení tohoto pole vůči směru toku [3].

Zdánlivá viskozita v neaktivovaném stavu (off-state), která je funkcí nosné kapaliny, aditiv, objemové procenta částic a distribucí rozměru částic, je hodnota kdy není aplikované magnetické pole [3]. MR kapalina v neaktivovaném stavu vykazuje viskoplastické vlastnosti s mezí toku podobné nátěrovým hmotám. Při nízkých hodnotách smykového napětí se jeví jako elastická pevná látka, když smykové napětí dosáhne kritické hodnoty kapalina začne téct a chová se jako kapalina newtonovská. Toto chování je možné popsat Binghamovým modelem (obr.5) (rovnice 1.3).

$$\tau = \tau_0 + \eta_0 \dot{\gamma} \quad (1.3)$$

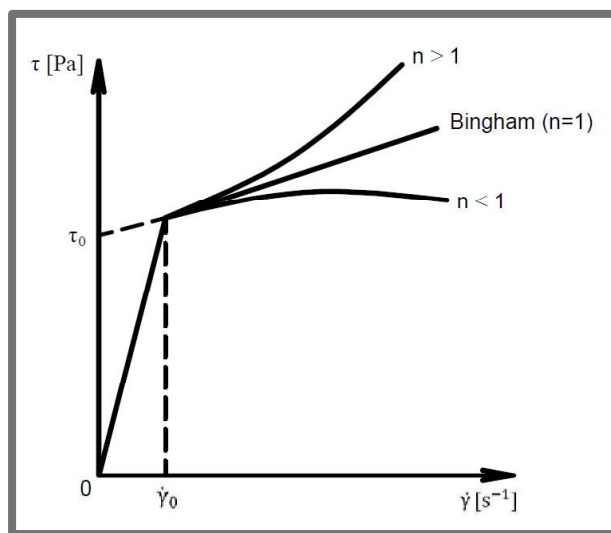
Kde τ je smykové napětí [Pa], τ_0 je mez toku [Pa], η_0 je plastická viskozita [Pa.s], která udává sklon newtonovské části křivky, $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] je smykový spád

Zatímco Binghamův model je užitečný pro konstrukční návrh MR zařízení, v skutečnosti chování MR kapaliny vykazuje značné odchylky od tohoto jednoduchého modelu. Z důvodu přidání aditiv a změnám v mikrostruktuře částic v průběhu smykového namáhání, mnoho MR kapalin vykazuje tixotropní a smykově

řídnoucí (shear thinning) chování [3]. V tomto případě je pro popis reologických vlastností MR kapalin vhodný Herschel-Bulkleyho model (rovnice 1.4), který popisuje nelineární (nenewtonovské) chování kapaliny po překročení meze toku.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (1.4)$$

Kde K je koeficient konzistence [-] a n je index toku [-], který udává, jestli je materiál smykově řídnoucí ($0 < n < 1$) nebo smykově houstnoucí ($n > 1$) (obr. 1.5).



Obr. 1.5 Ilustrace Binghamůvho a Herschel Bulkleyho modelu

Pro popis reologického chování MR kapaliny je tedy nutné znát mez toku, koeficient konzistence a index toku.

1.3 Mez toku MR kapalin

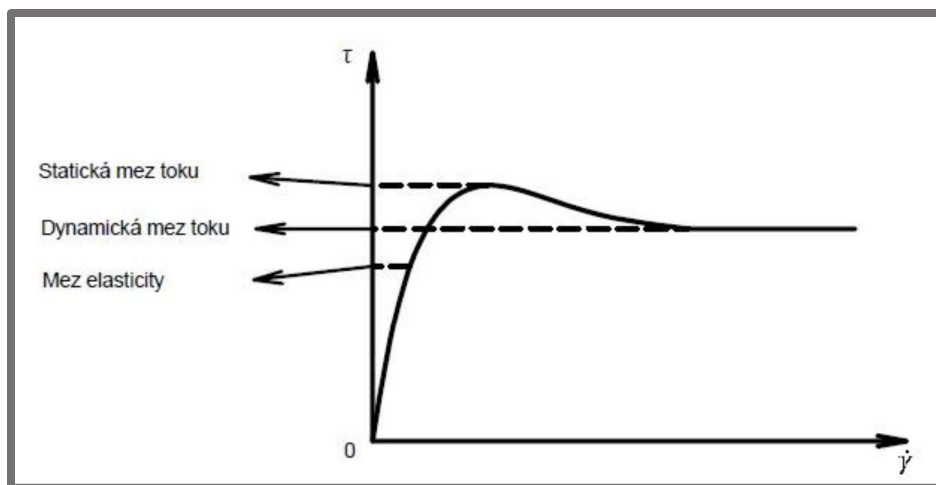
1.3

Mez toku je definovaná jako minimální napětí, které zapříčiní tečení kapaliny [6], pod touhle mezí se materiál chová jako elastická pevná látka. Mez toku v aktivovaném stavu dosahuje hodnot 10-130 kPa v závislosti na síle magnetického pole a objemového procenta částic v MR kapalině [8]. V neaktivovaném stavu je mez toku řádově nižší. Lineární Binghamův model předpokládá, že pro smykové napětí $\tau > \tau_0$ materiál začne téct jako Newtonovská kapalina o viskozitě η_0 . Kapalin s výraznou mezí toku je mnoho, patří mezi ne i magnetoreologické kapaliny. Ideálně se toková křivka porovná s lineárním Binghamovým modelem, který ale nerozeznává různé meze toku [7]. Reálně je ale chování suspenzí složitější a proto rozlišujeme tři různé meze toku: mez elasticity, statickou mez toku a dynamickou mez toku [9].

- **Mez elasticity** reprezentuje maximální smykové napětí, které může být aplikované, kdy se struktura ještě kompletně zotaví po odstranění tohoto napětí (Obr. 1.6) [9].
- **Statická mez toku** je minimální napětí pro způsobení toku kapaliny a běžně se určuje pomocí creep testu, tangenciální metodou a extrapolací křivky napětí v závislosti na smykovém spádu k nulovému smykovému spádu (Obr. 1.6) [9].

- **Dynamická mez toku** koresponduje s napětím potřebným k nepřetržitému rozbití struktury (Obr. 1.6) [9]. Přičemž dynamická mez toku je při MR kapalině typicky větší než statická [2].

V praxi se mez toku určuje extrapolací tokové křivky závislosti napětí na smykovém spádu MR kapaliny k nulovému smykovému spádu $\dot{\gamma} = 0$ [6]. Bylo zjištěno, že dynamická mez toku v přítomnosti magnetického pole vykazuje nárůst se zvyšujícím se objemovým podílem magnetických částic [10].



Obr. 1.6 Diagram popisující běžnou kapalinu vykazující různé meze toku [4]

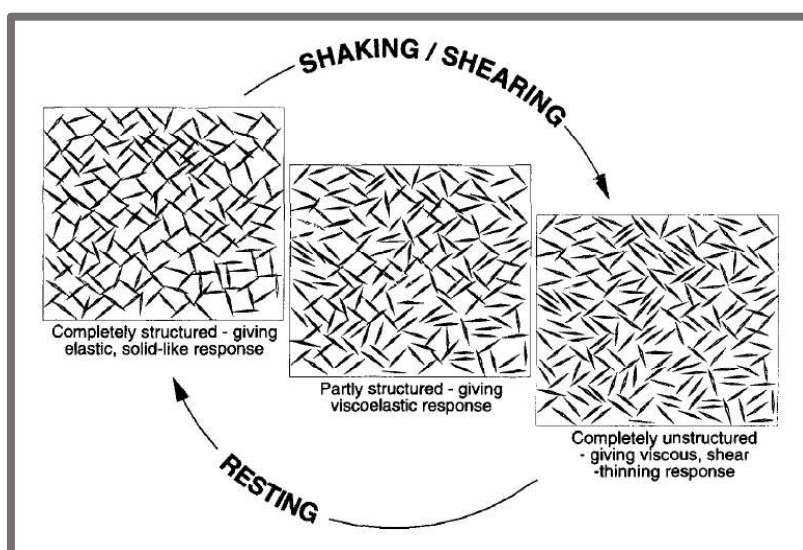
1.4

1.4.1

1.4 Kapaliny s časově závislou složkou deformace

1.4.1 Tixotropní chování

Tixotropie je definována jako snížení viskozity v čase při působení konstantního smykového napětí, následováno postupným obnovením viskozity, když je napětí odstraněno. [11] Tento jev je popsán jako dočasná reologická odezva mikrostruktury na změny v působení namáhání (Obr. 1.7) [11].



Obr. 1.7 Změna mikrostruktury kapaliny během zatěžování a relaxace [11]

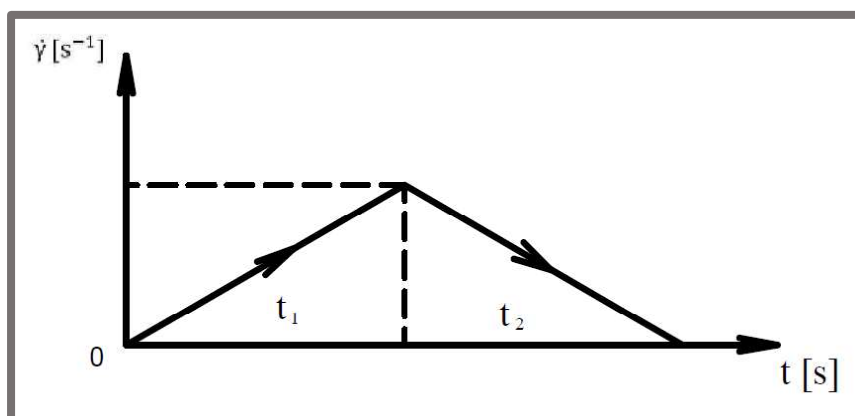
MR kapaliny podléhají sedimentaci, která může narušovat magnetoreologický efekt kvůli nerovnoměrné distribuci částic. Usazování částic může významně zabránit přidání tixotropního aditiva, které způsobí, že kapalina vytvoří při nezatíženém stavu tzv. tixotropní síť. Tixotropní síť je definovaná jako suspenze tvořená koloidními a magneticky aktivními částicemi, které při malém smykovém spádu zformují křehkou

síť nebo strukturu částic, občas nazývanou též shluk, flokulace [12], nebo seskupení vláken [11]. Tixotropní síť je zformována pomocí kolizí při toku a Brownovho pohybu. Brownův pohyb způsobující kolize s částicemi mikrostruktury, které způsobí usazení částic v preferované poloze [11]. Přítomnost téhle 3-dimensionální struktury dodá určitý stupeň tuhosti magnetoreologickému materiálu, čím zvýší sedimentační stabilitu. Když je aplikované malé smykové napětí, tahle struktura je lehce rozrušená. Když je napětí odstraněno, tahle křehká struktura je obnovena v průběhu času, přičemž obnova sítě trvá delší čas než destrukce.

Běžně používané tixotropní činidla jsou vodíkovo-vazebné činidla, koloidní aditiva jako oxidy kovů a jiné, nebo jejich kombinace. Vodíkovo-vazebné činidlo může být oligomerní sloučenina (polymer nebo kopolymer s nízkou molekulární hmotností) obsahující dipól, která dokáže intermolekulárně působit s jiným polárním oligomerem nebo částicí. Tahle forma interakce se běžně pojmenovává jako vodíková vazba nebo můstek. K vodíkovo-vazebnému tixotropnímu činidlu se pro zajištění formace tixotropní sítě může přidat koloidní aditivum schopné interakce skrze vodíkovou vazbu, používány jsou oxidy kovů, jako např. odpařený křemík, oxid titaničitý atd. [12]

Měření tixotropie

Jedna z oblíbených metod pro měření tixotropie je test pomocí tixotropní, nebo hysterese smyčky (thixotropic/hysteresis loop), kde se lineárně zvyšuje smykový spád z nuly po nějakou maximální hodnotu a poté se vrátí zpět k nule (Obr. 1.8). Oblast mezi vzestupní a sestupní křivkou v grafu závislosti smykového napětí na smykovém spádu určuje míru tixotropie [13] (Obr. 1.3). Můžeme určit také relativní hysterezní oblast, ta je definovaná jako poměr hysterezní oblasti k oblasti pod vzestupnou křivkou a může být také použita pro hodnocení míry tixotropie [13]



Obr. 1.8 Diagram závislosti smykového spádu na čase při měření tixotropní smyčky

1.5

1.5.1

1.5 Smykově řídnoucí a houstnoucí kapaliny**1.5.1 Smykově řídnoucí kapaliny (shear thinning) (Obr. 1.9)**

Termín smykové řídnutí popisuje ne-newtonovskou kapalinu, které klesá viskozita se stoupajícím smykovým spádem a je občas považované jako synonymum k pseudoplastickému chování kterému chybí časová závislost [14]. Když je zotavení viskozity velmi rychlé, pozorované chování označujeme jako smykově řídnoucí, protože hned jak odstraníme smykové napětí viskozita se vrátí do normálu. Kdyby zotavení viskozity zabralo měřitelný čas, hovoříme o tixotropním chování [11]. MR kapalina v aktivovaném i neaktivovaném stavu vykazuje smykově řídnoucí chování které je způsobené hlavně změnám v mikrostruktuře během namáhání a také aditivami, přičemž se snižuje se zvyšujícím se smykovým namáháním [15].

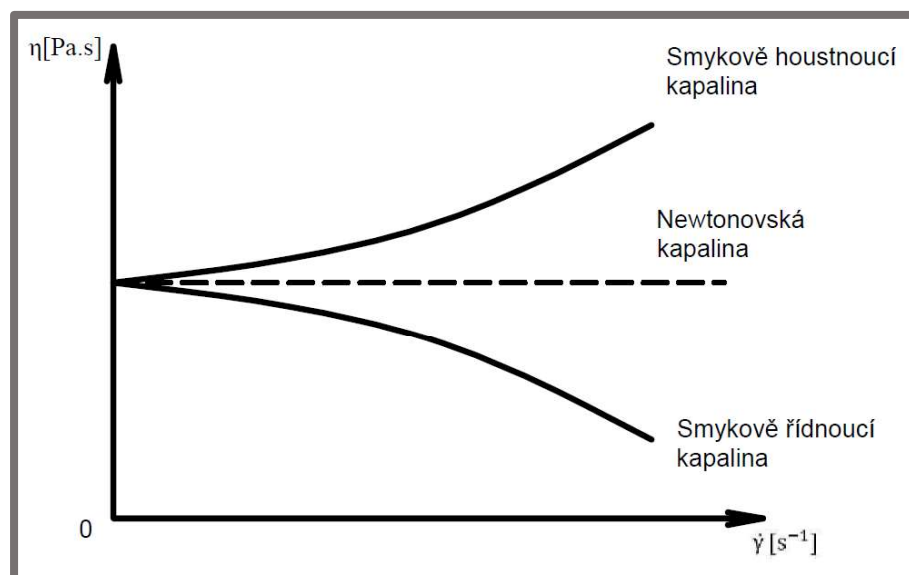
Určit míru smykového řídnutí můžeme proložením údajů závislosti smykového napětí na smykovém spádu například Herschel-Bulkleyho modelem (rovnice 1.4) a vypočtením indexu toku n .

1.5.2

1.5.2 Smykově houstnoucí kapaliny (shear thickening) (obr. 1.9)

Též nazývané dilatantní kapaliny jsou kapaliny, kde viskozita stoupá se stoupajícím smykovým spádem. MR kapaliny většinou vykazují smykové řídnutí, ale speciálně připravené MR kapaliny mohou vykazovat smykové houstnutí. Tyto kapaliny mohou být připraveny jako suspenze nanočástic křemíku o vysoké koncentraci, které nevytváří shluky a magnetických částic. Takle suspenze vykazuje náhlý nárůst viskozity po překročení kritického smykového spádu. Tyhle smykově řídnoucí MR kapaliny mají výhodu, že v určitých podmínkách nepotřebují externí zdroj energie a jejich vlastnosti se můžou měnit na základě zatěžování.[2]

Smykové houstnutí je určováno obdobně jako smykové řídnutí a to proložením Herschel-Bulkleyho modelem a určením indexu toku n .



Obr. 1.9 Ilustrace smykově řídnoucího chování

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2

Reologické vlastnosti MR kapalin závisí na koncentraci a hustotě částic, velikosti a tvaru částic, vlastností nosné kapaliny, přidaných aditiv, aplikovaného magnetického pole, teplotě a ostatních faktorů. Vzájemná závislost všech těchto faktorů je velmi komplexní, a tak je důležité stanovit metodologii pro optimalizaci vlastností pro konkrétní aplikace.

Hlavním cílem je určit metodologii testování na základě poznatků získaných v kritické rešerši a určení reologických vlastností různých dostupných MR kapalin za stejných podmínek v rozsahu teplot od -5°C do 100°C . Mezi základní vlastnosti, které budeme určovat patří dynamická mez toku, míra tixotropie, míra smykového řádnutí a zdánlivá viskozita.

3

3.1

3 MATERIÁL A METODY**3.1 Experimentální aparatura**

Experimenty budou probíhat na rotačním reometru Haake RotoVisco 1 s kapalinovou regulací teploty vzorku. Základní parametry: rozsah momentu 0,1- 50 mNm, rozsah otáček 0,0125-1000 min^{-1} . Reometr je ovládán pomocí přenosného PC a programu RheoWin (Obr. 3.1, 3.2).

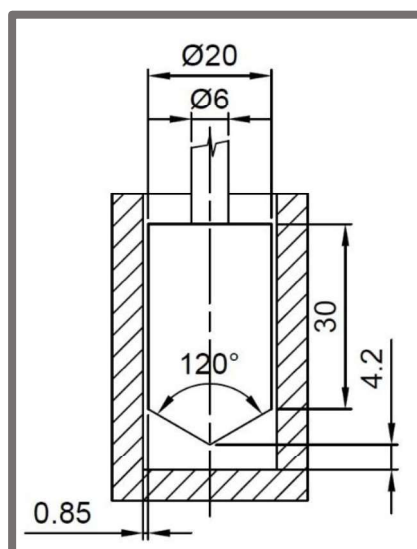


Obr. 3.1 Experimentální aparatura



Obr. 3.2 Experimentální aparatura

Jako měřicí tělesa jsou použity koncentrické válce Z20 DIN o rozměrech viz obr. 3.3. Materiál vnitřního válce je titan a materiál vnějšího válce je ocel. Kalkulační faktory jsou $A = 385800 \text{ Pa/N.m}$ a $M = 12.29 \text{ s}^{-1}/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$. Objem vzorku je 8,2 ml.



Obr. 3.3 Geometrie měřicího tělesa Z20 DIN

3.2 Metodika stanovení smykového napětí a smykového spádu

V případě rotačních reometrů se viskozita kapaliny počítá na základě Newtonovy rovnice (Rovnice 1) za definovaných podmínek jako čas měření, teplota, nebo tlak. Rotační reometry můžou pracovat v režimu CR (controlled rate - kontrolovaný spád, nebo rychlost), CS (controlled stress – kontrolovaný napětí) a CD (controlled deformation – kontrolovaná deformace). V případě režimu CR se měřicí tělísko otáčí nějakou úhlovou rychlostí, co způsobí v měřicím systému naplněném vzorkem smykový spád. Moment potřebný pro dosažení a udržení tohoto smykového spádu je použit pro určení viskozity. Při režimu CS je princip opačný. Moment (smykové napětí) je nastaven a vzniklá úhlová rychlost (smykový spád) je změřena. Při režimu CD je zkoumána reakce vzorku na kontrolovanou deformaci po mikro-krocích.

V našem případě pracujeme v režimu CR.

Vztahy mezi momentem, úhlovou rychlostí, smykovým napětím a smykovým spádem jsou uvedené následovně:

$$\tau = M_d \cdot C \quad (3.1)$$

kde τ [Pa] je smykové napětí, M_d [N. m] je krouticí moment, A [Pa/Nm] je faktor smykového napětí který má velikost podle geometrie měřicího tělesa. Velké hodnoty A odpovídají malým měřicím tělesům.

$$\dot{\gamma} = \Omega \cdot M \quad (3.2)$$

kde $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] je smykový spád, Ω [s^{-1}] je úhlová rychlost a $M [\frac{s^{-1}}{rad.s^{-1}}]$ je faktor geometrie. Velké hodnoty M odpovídají malým mezerám.

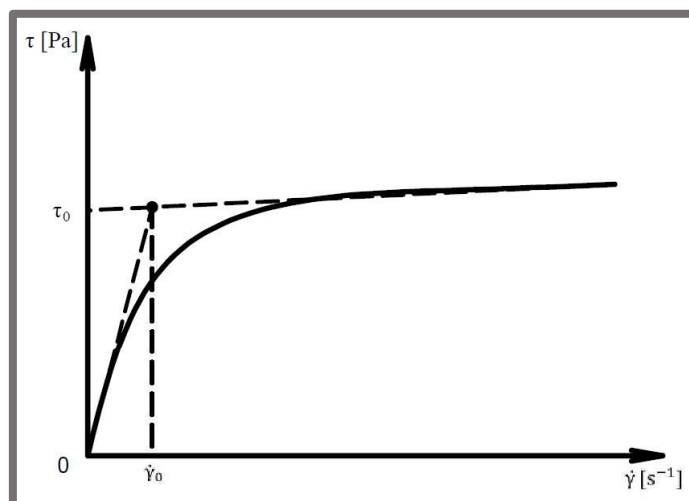
3.3 Metodika měření

Měření každého vzorku probíhá za teplot: $-5^{\circ}C$, $-3^{\circ}C$, $0^{\circ}C$, $5^{\circ}C$, $10^{\circ}C$, $20^{\circ}C$, $30^{\circ}C$, $40^{\circ}C$, $60^{\circ}C$, $80^{\circ}C$, $100^{\circ}C$. Čas měření pro jednu teplotu je přibližně 6 minut.

Nastavení požadované teploty není jednoduché z důvodu rozdílných teplotních podmínek okolí při každém testu a tak se může teplota lišit pro každý vzorek. Nutné je dosáhnout ustálenou teplotu pro konkrétní měření a to s rozptylem $\pm 0,1^{\circ}C$, přičemž nejcitlivější jsou měření při nízkých teplotách, kde už malé rozdíly teplot výrazněji ovlivňují viskozitu nosné kapaliny a tak i celkově MR kapaliny. Před měřením je provedeno měření hustoty MR kapalin.

3.3.1 Měření meze toku kapaliny

Měření meze toku probíhá při smykovém spádu $\dot{\gamma} = 0 - 2s^{-1}$, čas testu je 15s. Před každým testem je kapalina míchána přímo v reometru při smykovém spádu $100 s^{-1}$ a následně je v klidu po dobu 10s. Mez toku je určena proložením tokové části křivky, která reprezentuje tečení kapaliny přímkou (Binghamovým modelem) a extrapolací k nulovému smykovému spádu. Část křivky, která reprezentuje tečení kapaliny je určena průsečíkem tečen k elastické části a tokové části křivky. Tenhle průsečík udává kritický smykový spád a určuje rozsah hodnot pro proložení přímkou pro určení meze toku. (Obr. 11)



Obr. 3.4 Proložení experimentálních dat Binghamovým modelem

3.3.2

3.3.2 Měření viskozity při různých konstantních smykových spádech (CR test-constant rate test)

CR test je prováděn pro tři hodnoty smykového spádu a to 150 s^{-1} , 400 s^{-1} , a pokud je to možné kvůli maximálnímu smykovému napětí (resp. maximálnímu momentu) 800 s^{-1} , jinak se podle potřeby sníží. Doba testu je 50s. Před každým testem je kapalina míchána přímo v reometru při smykovém spádu 100 s^{-1} a následně je v klidu po dobu 10s. Dynamická viskozita je určena jako průměrná hodnota ustálené části křivky. Zjištěné hodnoty jsou následně vyneseny do grafu a proloženy Reynoldsovou rovnicí (Rovnice 3.3) popisující závislost viskozity na teplotě.

$$\eta = X \cdot e^{(-Y \cdot T)} \quad (3.3)$$

kde $X [-]$ a $Y [-]$ jsou koeficienty Reynoldsové rovnice a $T [^{\circ}\text{C}]$ je teplota.

3.3.3

3.3.3 Sweep test, určování indexu toku a koeficientu konzistence dle Herschel-Bulkleyho modelu.

Sweep test je prováděn v rozsahu smykového spádu $\dot{\gamma} = 0 - 1000 - 0 \text{ s}^{-1}$. Po dobu 50s smykový spád roste až na hodnotu 1000 s^{-1} a následně 50s klesá zpátky na nulu. Před každým testem je kapalina míchána přímo v reometru při smykovém spádu 100 s^{-1} a následně je v klidu po dobu 10s. Pro potřeby určení indexu toku a koeficientu konzistence je použita vzestupná část křivky. Naměřené data jsou proloženy Herschel-Bulkleyho modelem (Rovnice 1.4, Obr. 1.4) ve výpočetním programu Matlab.

3.3.4

3.3.4 Sweep test, tixotropní smyčka

Sweep test je prováděn v rozsahu smykového spádu $\dot{\gamma} = 0 - 1000 - 0 \text{ s}^{-1}$. Po dobu 50s smykový spád roste až na hodnotu 1000 s^{-1} a následně 50s klesá zpátky na nulu. Před každým testem je kapalina míchána přímo v reometru při smykovém spádu 100 s^{-1} a následně je v klidu po dobu 10s. Míra tixotropie je určena velikostí obsahu plochy vytvořené vzestupní a sestupní křivkou určeným ve výpočetním programu Matlab.

3.4 Vzorky měřených MR kapalin

Měřeny jsou tři experimentální kapaliny čínského výrobce Haohua Co., které mají poměrně vysoký podíl částic v nosné kapalině, viz Tab. 3.1.



Obr. 3.5 Vzorek připravený na měření

Tab. 3.1 Vzorky měřených MR kapalin, údaje výrobce.

Výrobce, označení	Haohua Co. No. 10	Haohua Co. No. 11	Haohua Co. No. 12
Magnetické částice	Karboonylové železo	Karboonylové železo	Karboonylové železo
Obsah pevných částic [%]	75,5	80,5	85,5
Hustota [g/cm ³]	2.55	3.05	3.55
Nosná kapalina	polyalfaolefin	polyalfaolefin	polyalfaolefin
Dynamická viskozita [Pa.s], $\dot{\gamma} = 1000\text{s}^{-1}$, 40°C, 0A (neaktivovaný stav)	0,2425	0,3825	0.6883
Smykové napětí [kPa], $\dot{\gamma} = 10\text{s}^{-1}$, 40°C, 4A (aktivovaný stav)	55,25	73,27	96,99
Mez toku [kPa], 4A (aktivovaný stav)	41,28	52,1	58,6
Aditiva	Disperzní činidlo, spojovací činidlo, tixotropní činidlo.	Disperzní činidlo, spojovací činidlo, tixotropní činidlo.	Disperzní činidlo, spojovací činidlo, tixotropní činidlo.

4

4 VÝSLEDKY

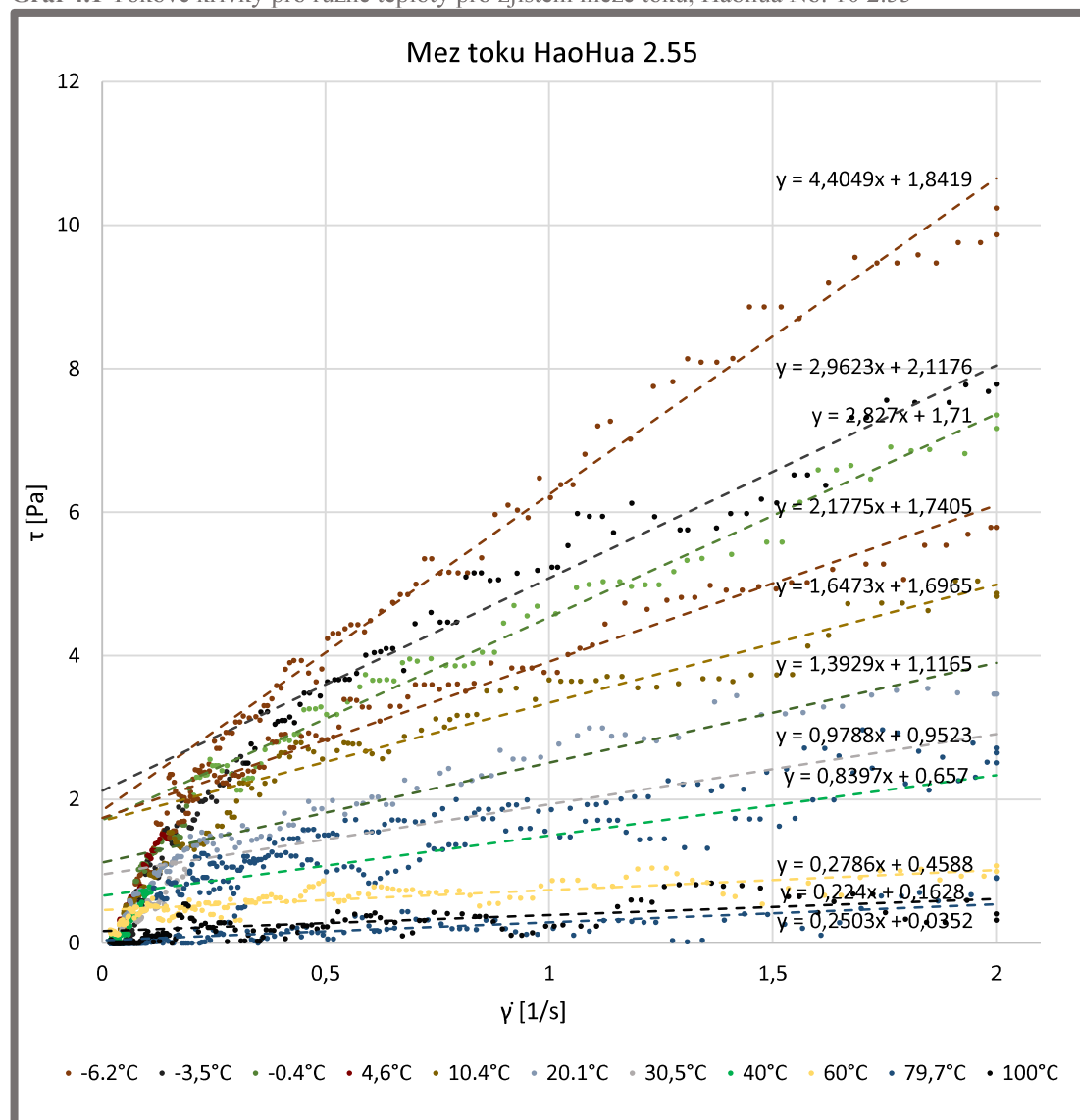
Před měřením bylo provedeno měření hustoty MR kapalin: Haohua No. 10 2.55 – 2,44 g/cm³, Haohua No. 11 3.05 – 2,85 g/cm³, Haohua No. 11 3.55 – 3,59 g/cm³. Naměřené hodnoty mají malé odchylky od hodnot výrobce, které mohou být ale způsobené nepřesností měření.

4.1

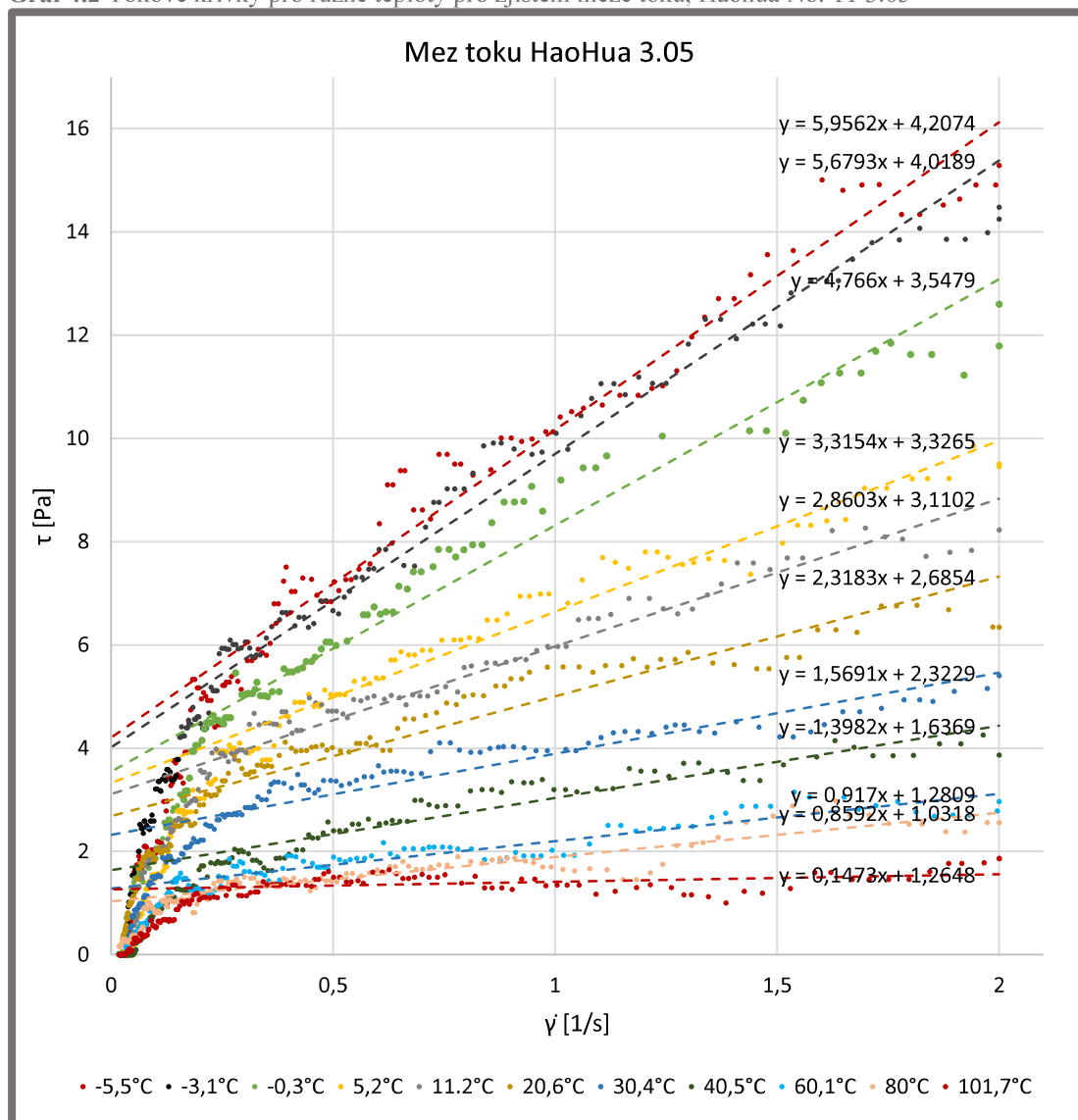
4.1 Mez toku Haohua No. 10, No. 11, No. 12

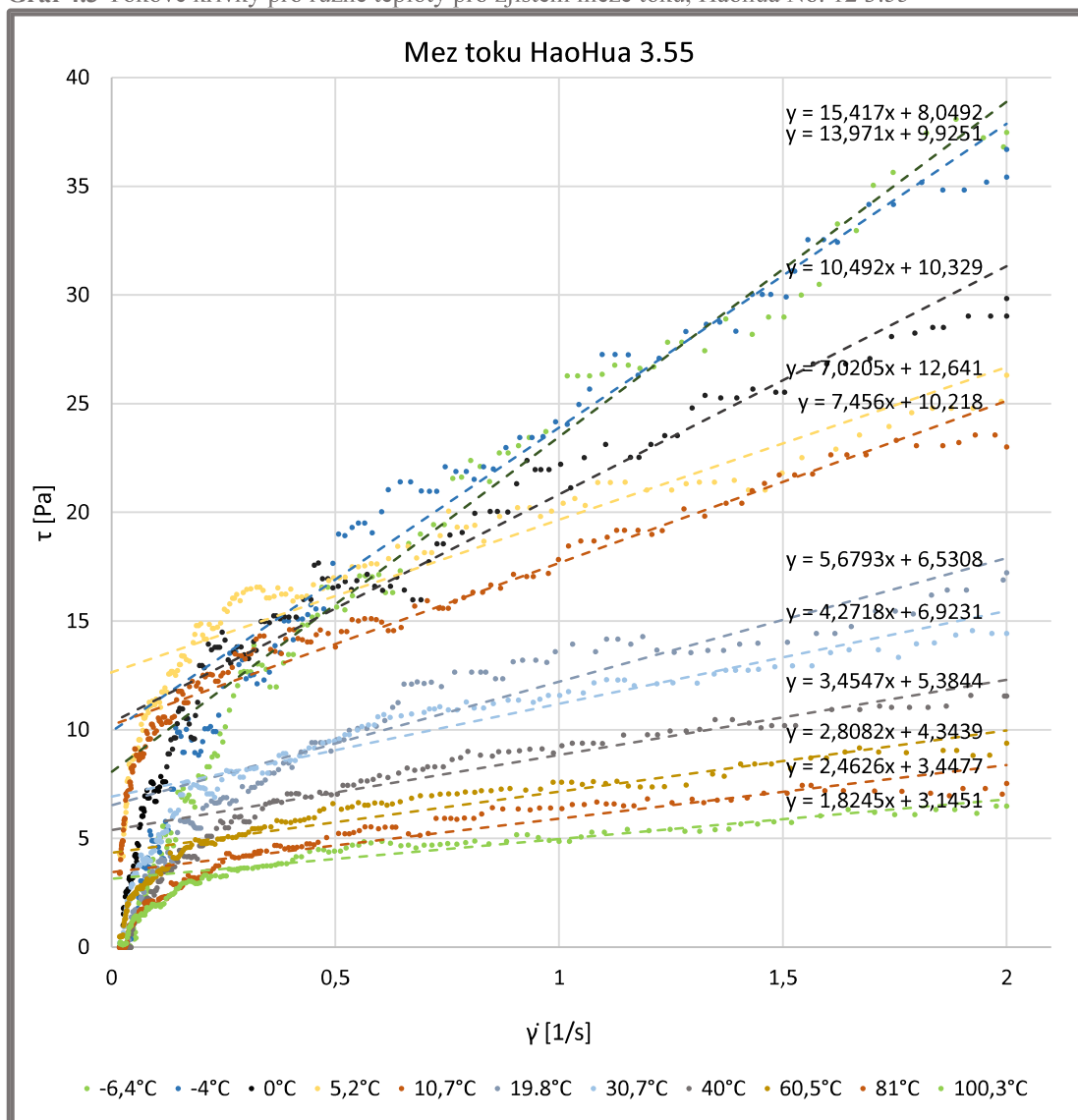
Měření probíhá při smykovém spádu 0-2 s⁻¹, čas testu je 15s. Naměřené data jsou následně proloženy metodou popsanou v kapitole 3.3.1. Zjištěné hodnoty jsou vyneseny do grafu závislosti meze toku na teplotě.

Graf 4.1 Tokové křivky pro různé teploty pro zjištění meze toku, Haohua No. 10 2.55



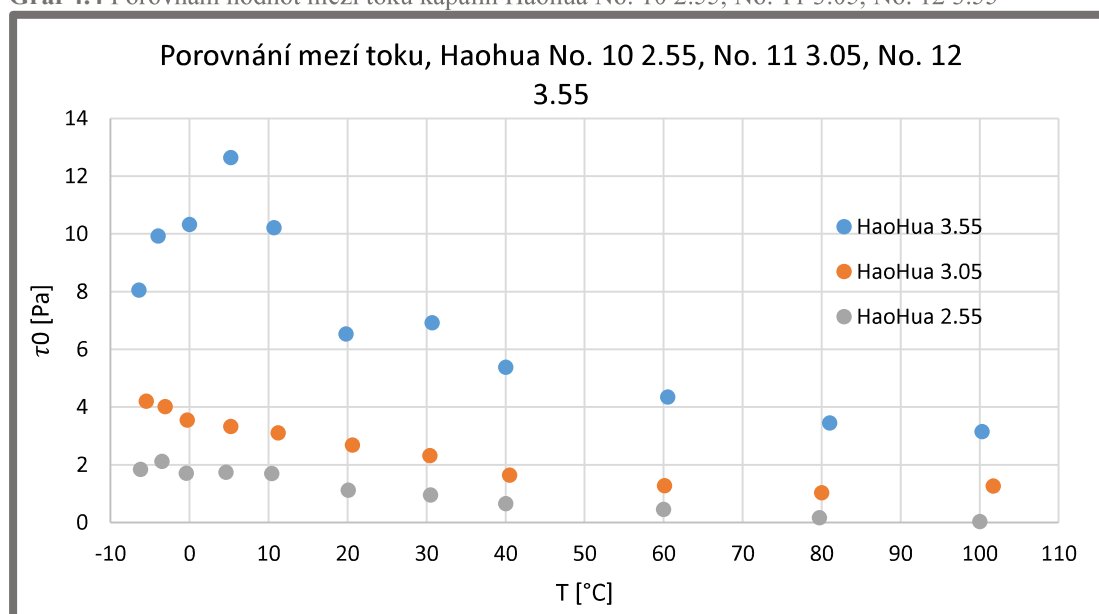
Graf 4.2 Tokové křivky pro různé teploty pro zjištění meze toku, HaoHua No. 11 3.05



Graf 4.3 Tokové křivky pro různé teploty pro zjištění meze toku, Haohua No. 12 3.55

Tab. 4.1 Přehled hodnot meze toku kapalin Haohua No. 10 2.55 , No. 11 3.05 , No. 12 3.55

T [°C]	-6,2	-3,5	-0,4	4,6	10,4	20,1	30,5	40	60	79,7	100
τ_{00} [Pa] No.10	1,84	2,12	1,71	1,74	1,70	1,12	0,95	0,66	0,46	0,16	0,04
T [°C]	-5,5	-3,1	-0,3	5,2	11,2	20,6	30,4	40,5	60,1	80	101,7
τ_{01} [Pa] No. 11	4,21	4,02	3,55	3,33	3,11	2,69	2,32	1,64	1,28	1,03	1,26
T [°C]	-6,4	-4	0	5,2	10,7	19,8	30,7	40	60,5	81	100,3
τ_{02} [Pa] No. 12	8,05	9,93	10,33	12,64	10,22	6,53	6,92	5,38	4,34	3,45	3,15

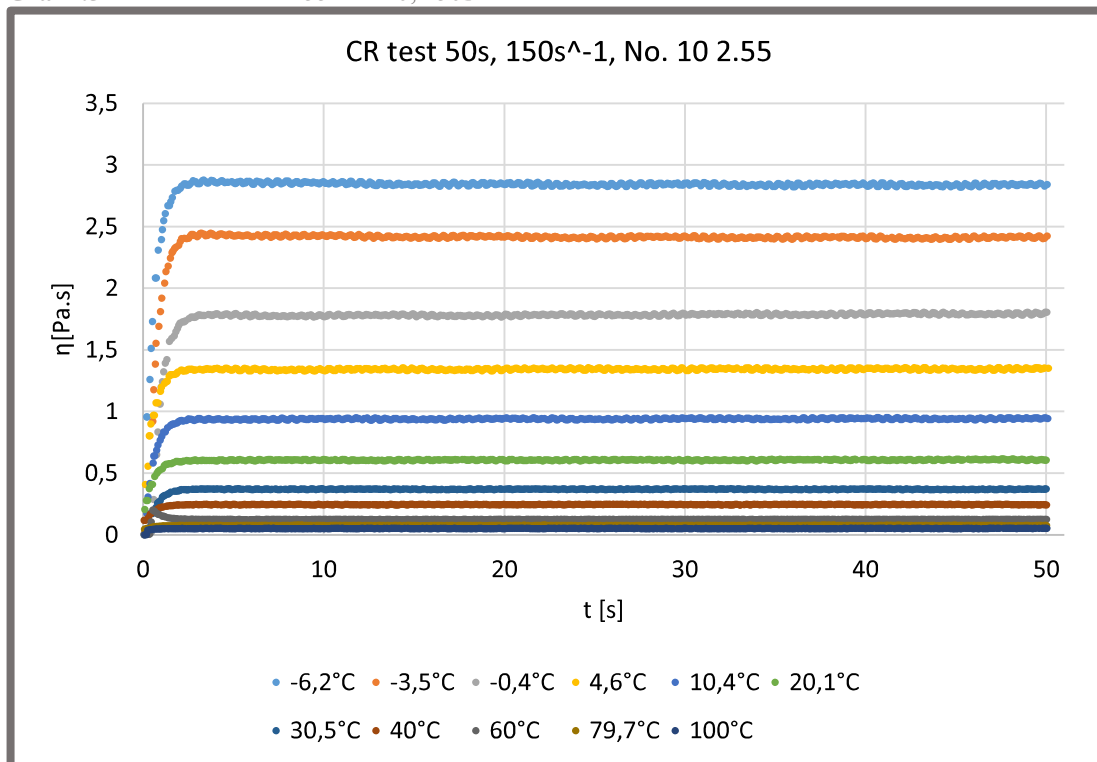
Graf 4.4 Porovnání hodnot mezí toku kapalin Haohua No. 10 2.55, No. 11 3.05, No. 12 3.55

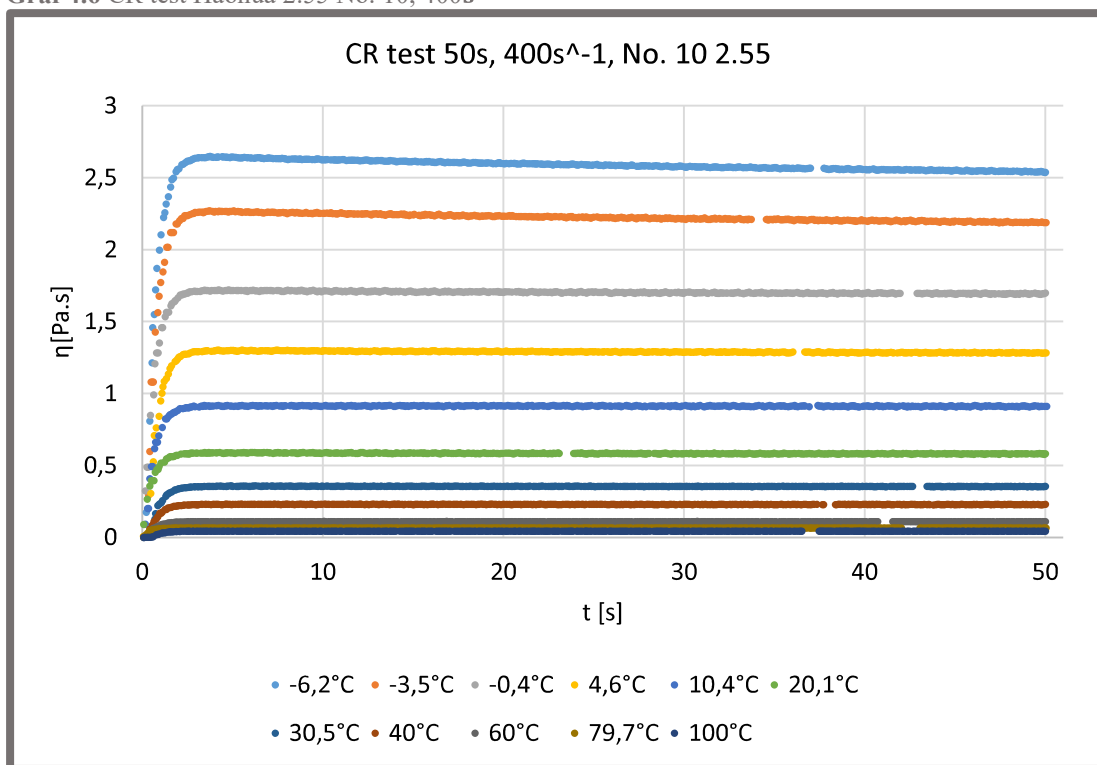
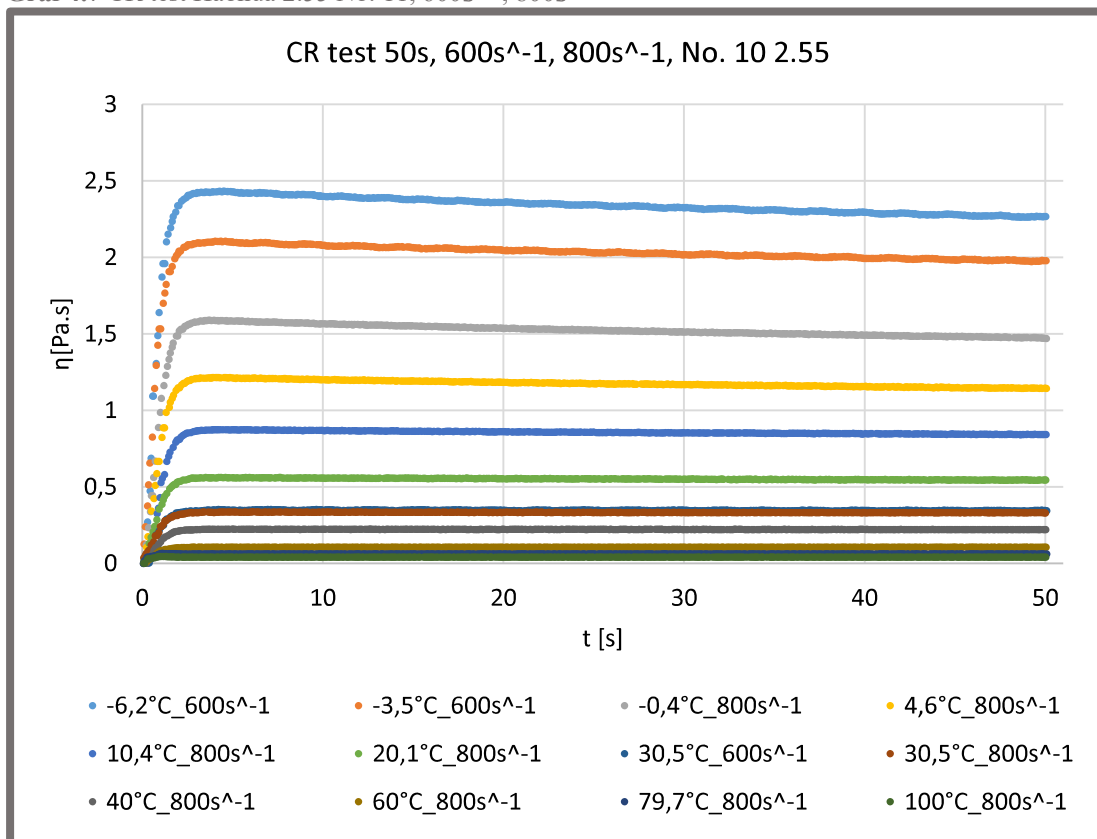
4.2

4.2 CR test

CR test probíhá metodou popsanou v kapitole 3.3.2. Naměřené data jsou vykreslena do grafu závislosti viskozity na čase pro různé teploty a smykové spády, následně jsou určeny průměrné hodnoty dynamické viskozity v čase a ty jsou vyneseny do grafu závislosti dynamické viskozity na teplotě, který je proložen Reynoldsovou rovnicí (Rovnice 3.3) pro zjištění koeficientů.

3.3.4

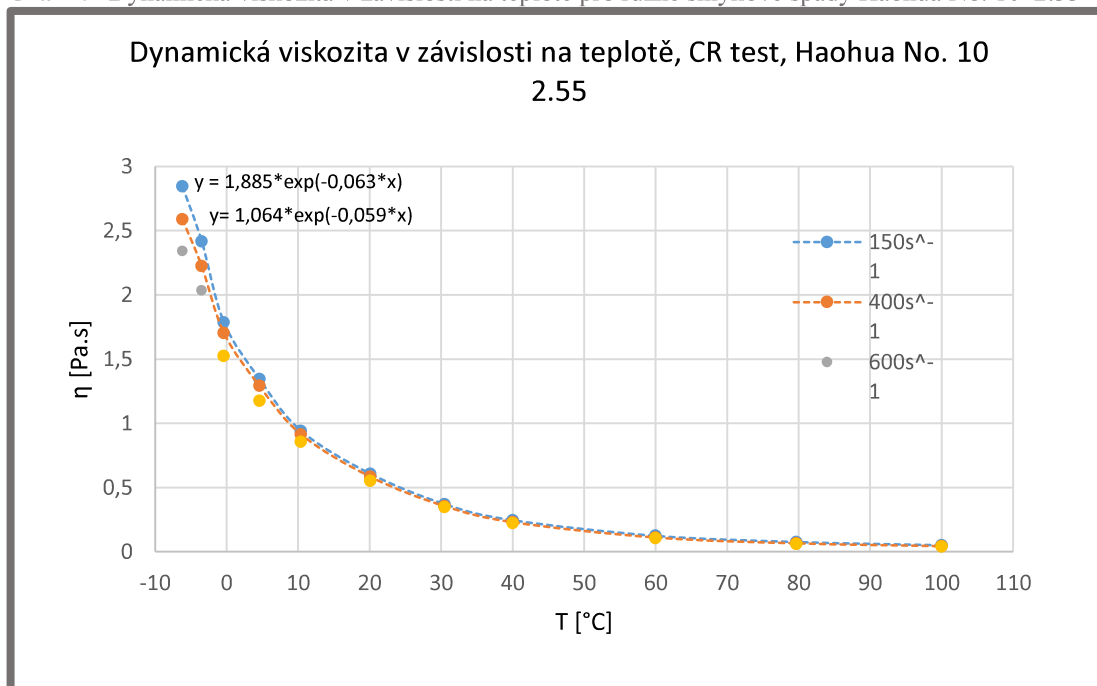
4.2.1 CR test Haohua No. 10 2.55**Graf 4.5** CR test Haohua 2.55 No. 10, 150s^{-1} 

Graf 4.6 CR test Haohua 2.55 No. 10, 400s^{-1} Graf 4.7 CR test Haohua 2.55 No. 11, 600s^{-1} , 800s^{-1} 

Tab 4.2 Přehled výsledků CR testů Haohua 2.55 No. 10

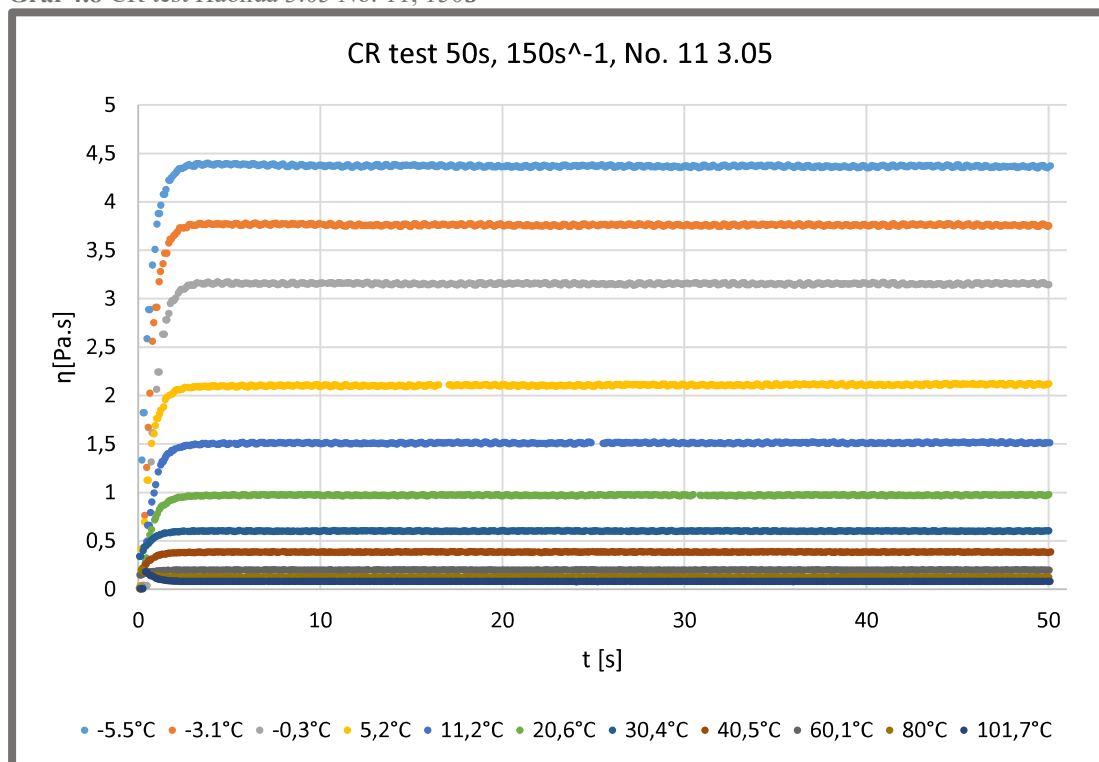
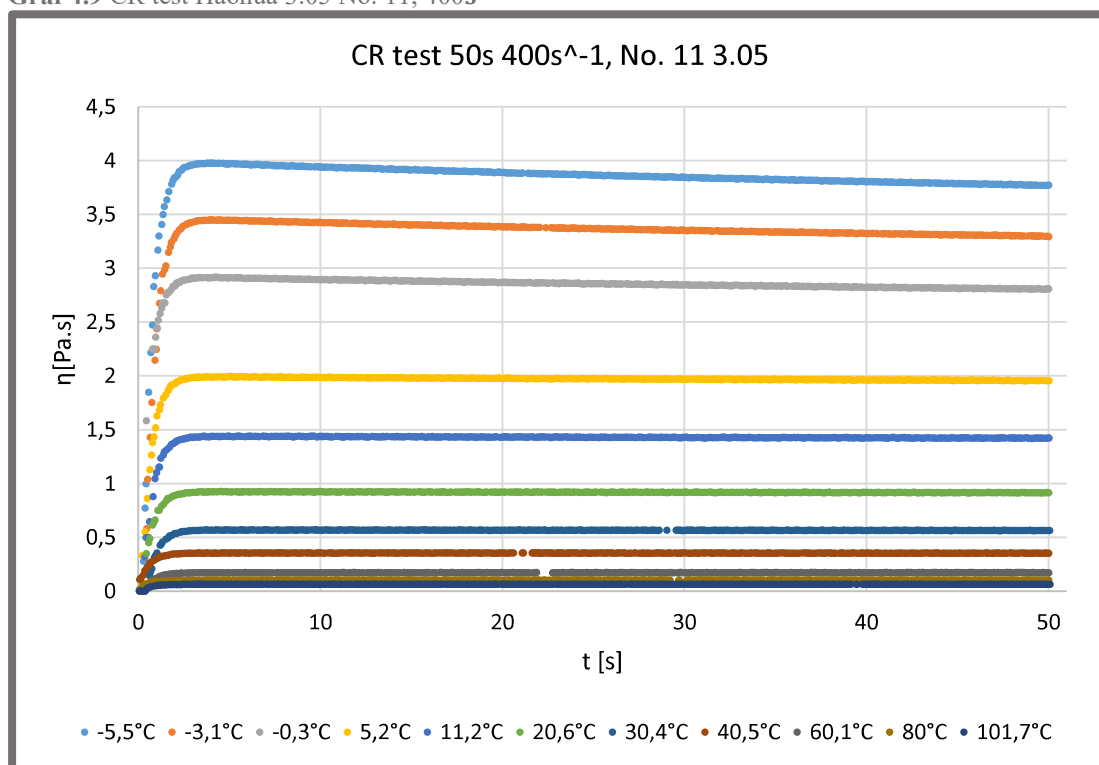
	$\eta_{150s^{-1}} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$	$\eta_{400s^{-1}} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$	$\eta_{600s^{-1}} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$	$\eta_{800s^{-1}} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$
-6,2°C	2,844	2,589	2,341	
-3,5°C	2,417	2,225	2,034	
-0,4°C	1,785	1,704		1,525
4,6°C	1,344	1,291		1,176
10,4°C	0,941	0,913		0,856
20,1°C	0,608	0,584		0,552
30,5°C	0,371	0,355		0,347
40°C	0,246	0,230		0,223
60°C	0,125	0,111		0,105
79,7°C	0,076	0,066		0,062
100°C	0,052	0,044		0,041
Koeficienty Reynoldsové rovnice:				
	$X_{150s^{-1}}$	$Y_{150s^{-1}}$	$X_{400s^{-1}}$	$Y_{400s^{-1}}$
	1,885	0,063	1,764	0,059

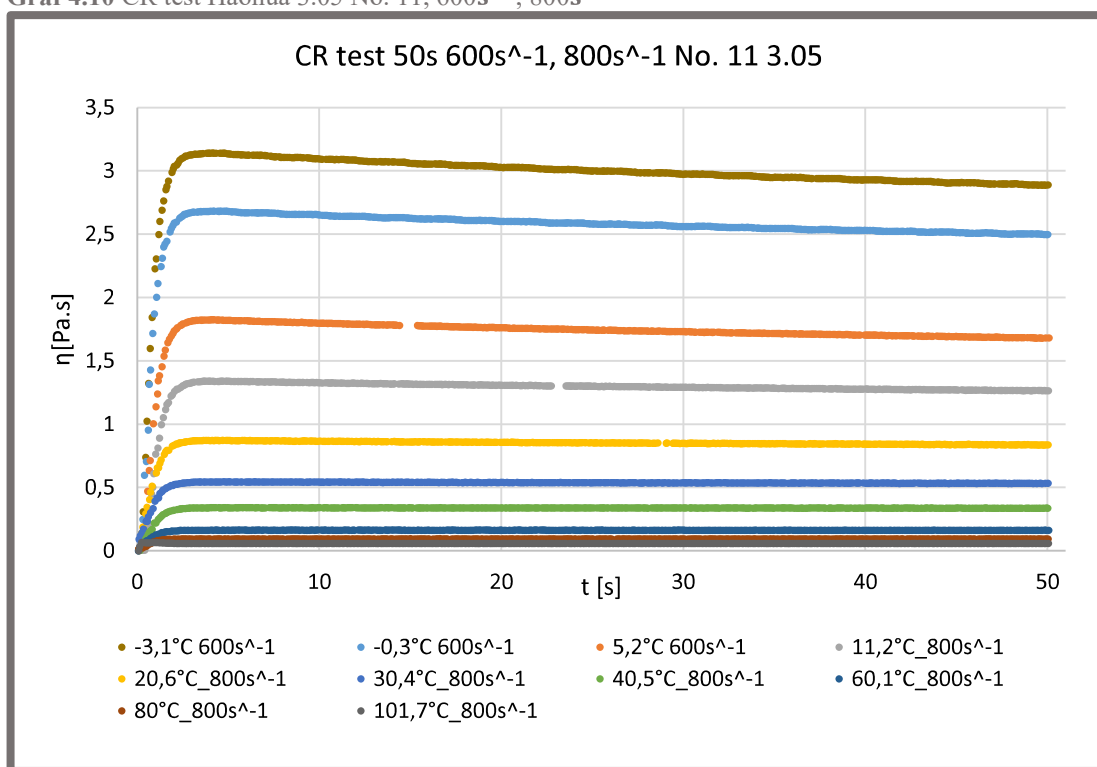
Graf 4.7 Dynamická viskozita v závislosti na teplotě pro různé smykové spády Haohua No. 10 2.55



4.2.2 CR test Haohua 3.05 No. 11

4.2.2

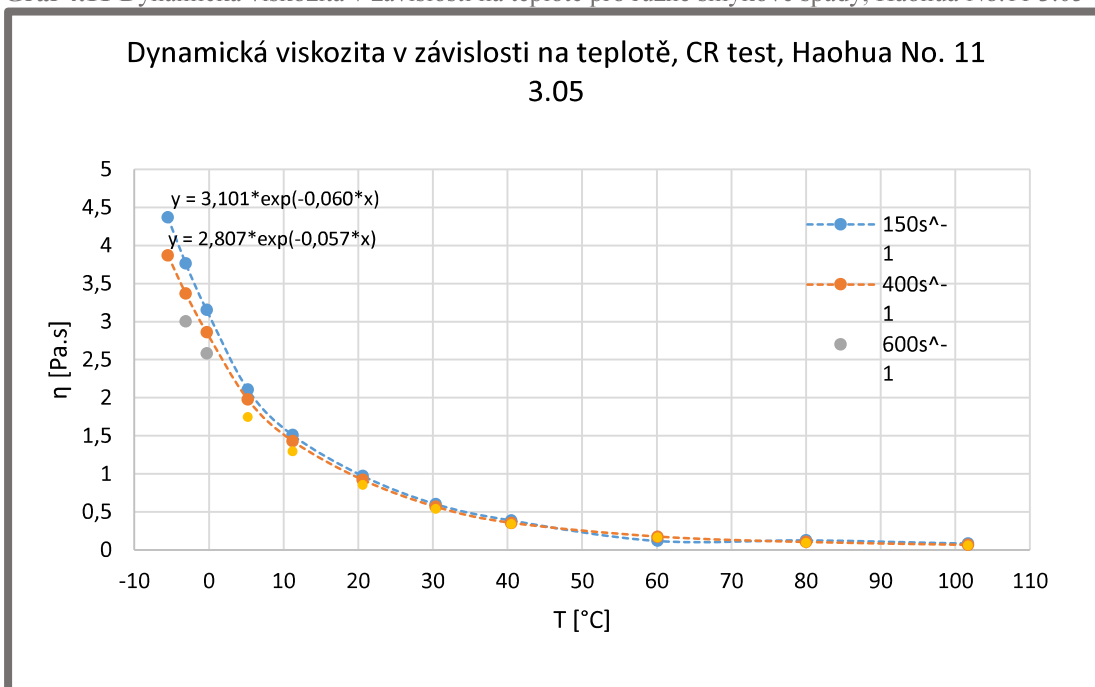
Graf 4.8 CR test Haohua 3.05 No. 11, 150s^{-1} Graf 4.9 CR test Haohua 3.05 No. 11, 400s^{-1} 

Graf 4.10 CR test Haohua 3.05 No. 11, $600s^{-1}$, $800s^{-1}$ 

Tab 4.3 Přehled výsledků CR testů Haohua 3.05 No. 11

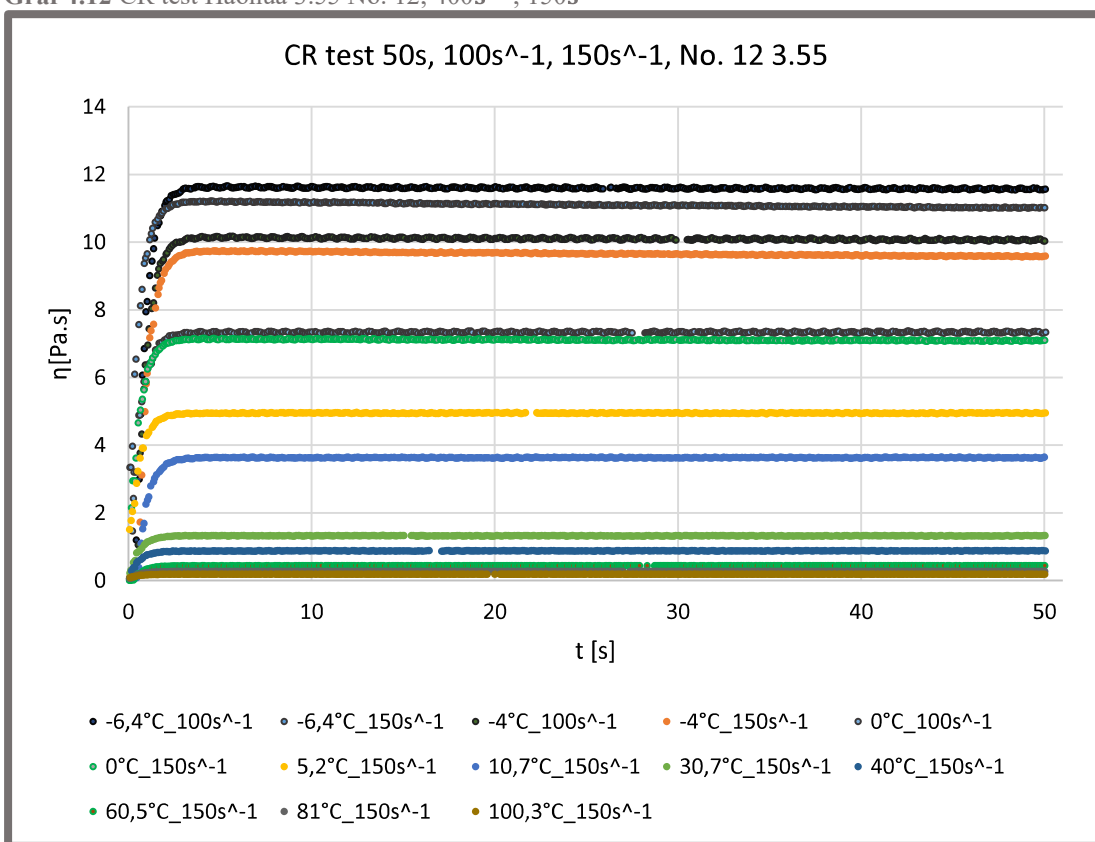
	$\eta_{150s^{-1}} [Pa.s]$	$\eta_{400s^{-1}} [Pa.s]$	$\eta_{600s^{-1}} [Pa.s]$	$\eta_{800s^{-1}} [Pa.s]$
$-5,5^{\circ}C$	4,371	3,868		
$-3,1^{\circ}C$	3,764	3,369	3,004	
$-0,3^{\circ}C$	3,154	2,858	2,584	
$5,2^{\circ}C$	2,107	1,975		1,747
$11,2^{\circ}C$	1,511	1,430		1,294
$20,6^{\circ}C$	0,972	0,920		0,853
$30,4^{\circ}C$	0,602	0,567		0,538
$40,5^{\circ}C$	0,386	0,354		0,339
$60,1^{\circ}C$	0,120	0,173		0,163
$80^{\circ}C$	0,127	0,103		0,094
$101,7^{\circ}C$	0,083	0,065		0,058
Koeficienty Reynoldsové rovnice:				
	$X_{150s^{-1}}$	$Y_{150s^{-1}}$	$X_{400s^{-1}}$	$Y_{400s^{-1}}$
	3,101	0,060	2,807	0,057

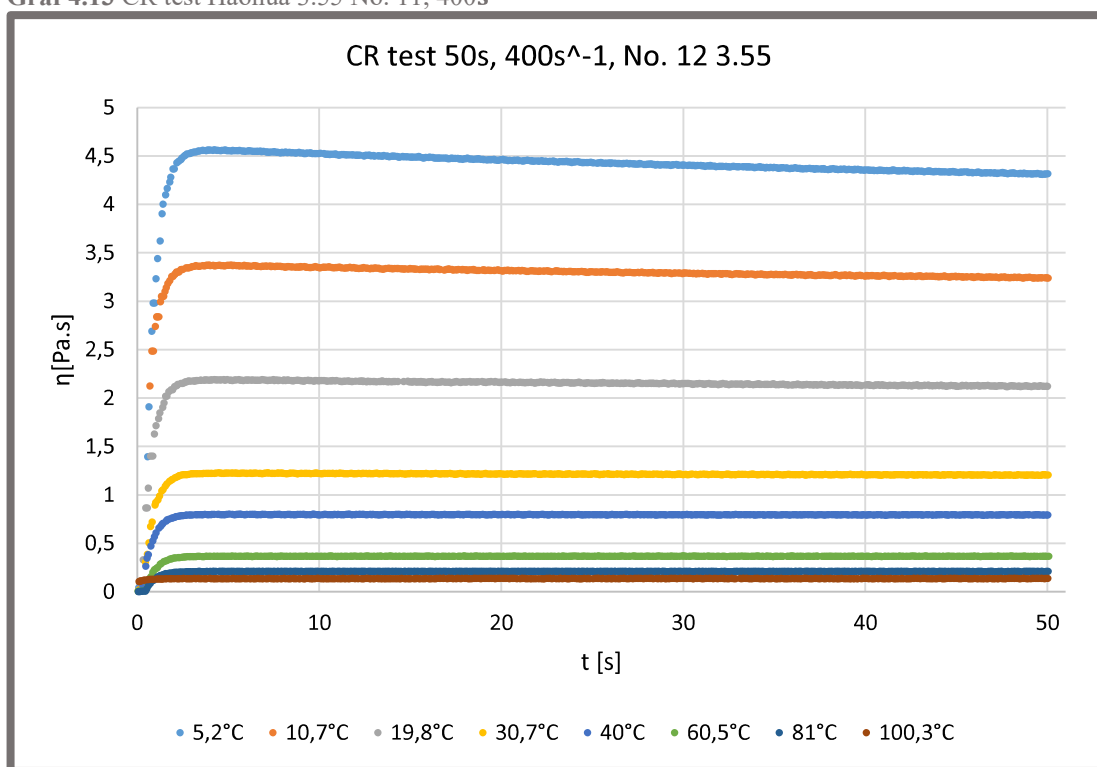
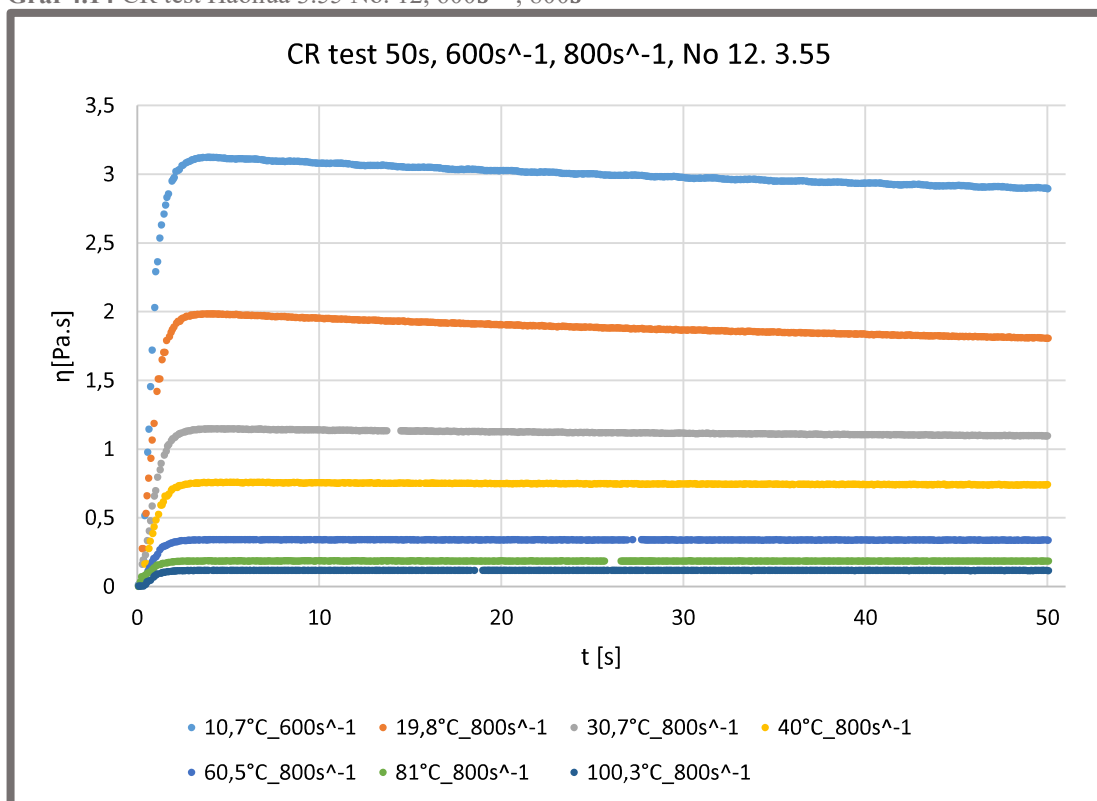
Graf 4.11 Dynamická viskozita v závislosti na teplotě pro různé smykové spády, Haohua No.11 3.05



4.2.3 CR test Haohua 3.55 No. 12

4.2.3

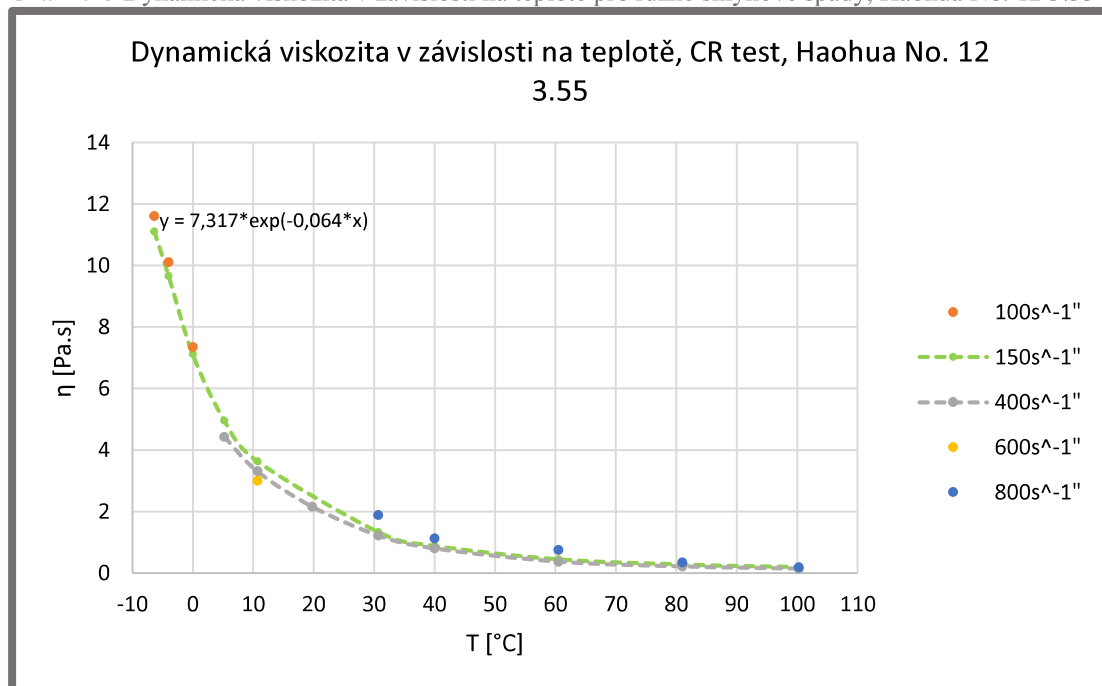
Graf 4.12 CR test Haohua 3.55 No. 12, 400s⁻¹, 150s⁻¹

Graf 4.13 CR test Haohua 3.55 No. 11, 400s^{-1} Graf 4.14 CR test Haohua 3.55 No. 12, 600s^{-1} , 800s^{-1} 

Tab 4.4 Přehled výsledků CR testů Haohua 3.55 No. 12

	$\eta_{100s^{-1}} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$	$\eta_{150s^{-1}} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$	$\eta_{400s^{-1}} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$	$\eta_{600s^{-1}} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$	$\eta_{800s^{-1}} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$
-6,4°C	11,602	11,107			
-4°C	10,104	9,660			
-0°C	7,343	7,117			
5,2°C		4,956	4,428		
10,7°C		3,637	3,304	3,002	
19,8°C			2,155		1,888
30,7°C		1,330	1,215		1,121
40°C		0,884	0,797		0,748
60,5°C		0,446	0,368		0,339
81°C		0,278	0,211		0,187
100,3°C		0,195	0,138		0,118
Koeficienty Reynoldsové rovnice:					
	$X_{150s^{-1}}$		$Y_{150s^{-1}}$		
	7,317		0,064		

Graf 4.15 Dynamická viskozita v závislosti na teplotě pro různé smykové spády, Haohua No. 12 3.55



4.3

4.3 Sweep test, určení indexu toku a koeficientu konzistence

Při určování koeficientu konzistence a indexu toku vycházíme z dat získaných z měření smyčky $0-1000-0s^{-1}$, přičemž je využita vzestupní část křivky. Data jsou vyhodnocena metodou popsanou 3.3.3. Z předchozího CR testu bylo zjištěno, že v některých případech při nízké teplotě a vysokém smykovém spádu klesá viskozita v čase, proto jsou pro určení indexu toku a koeficientu konzistence též data do smykového spádu $200s^{-1}$, kde se tenhle negativní jev nevyskytuje.

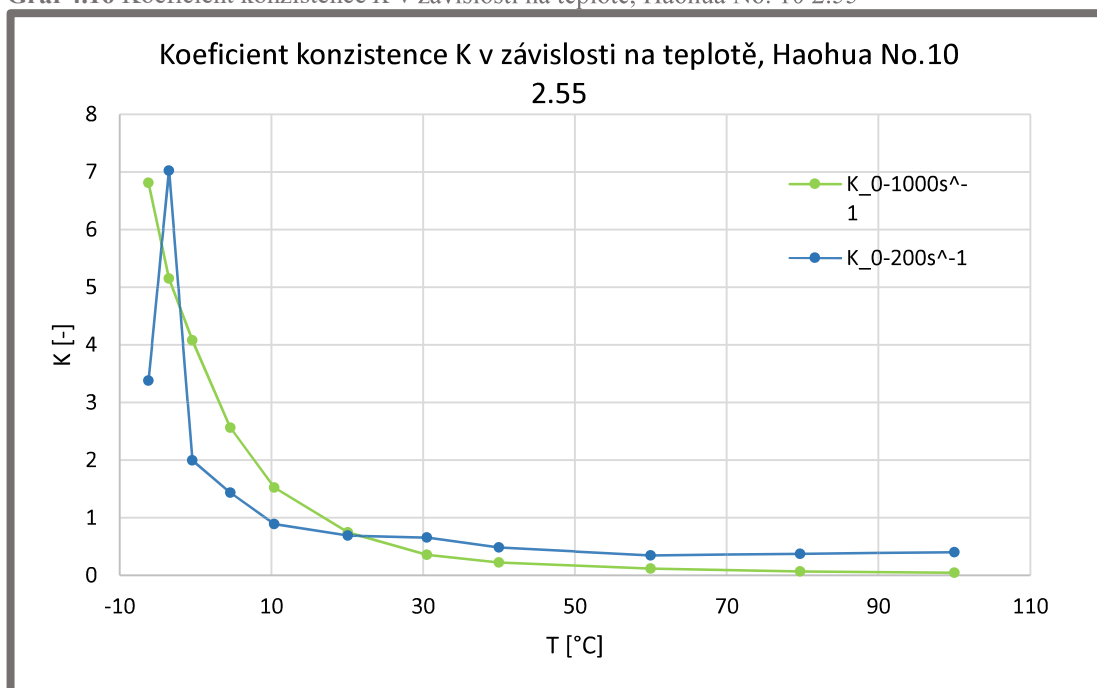
4.3.1

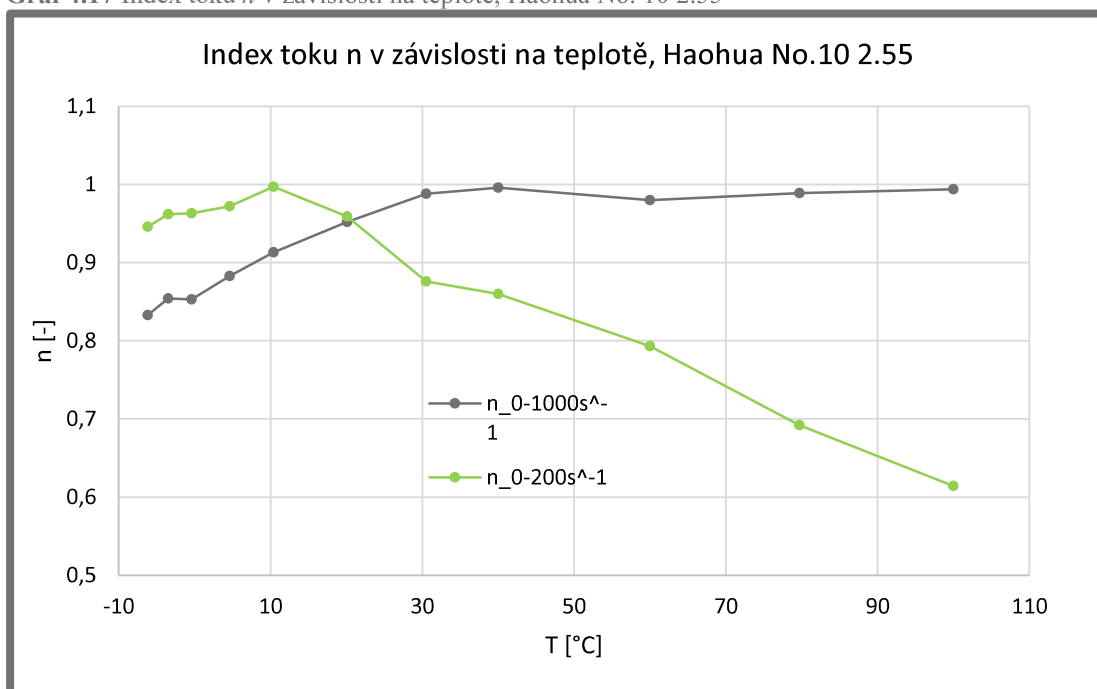
4.3.1 Koeficient konzistence a index toku Haohua No. 10 2.55

Tab. 4.5 Koeficient konzistence a index toku dle Herschel-Bulkleyho modelu kapaliny Haohua No. 12 3.55

	$K_{0-1000s^{-1}}[-]$	$n_{0-1000s^{-1}}[-]$	$K_{0-200s^{-1}}[-]$	$n_{0-200s^{-1}}[-]$
-6,2°C	6,808	0,833	3,378	0,946
-3,5°C	5,147	0,854	7,02	0,962
-0,4°C	4,073	0,853	1,992	0,963
4,6°C	2,557	0,883	1,43	0,972
10,4°C	1,521	0,913	0,886	0,997
20,1°C	0,743	0,952	0,689	0,959
30,5°C	0,353	0,988	0,655	0,876
40°C	0,221	0,996	0,480	0,860
60°C	0,115	0,980	0,342	0,793
79,7°C	0,063	0,989	0,372	0,692
100°C	0,040	0,994	0,399	0,614

Graf 4.16 Koeficient konzistence K v závislosti na teplotě, Haohua No. 10 2.55



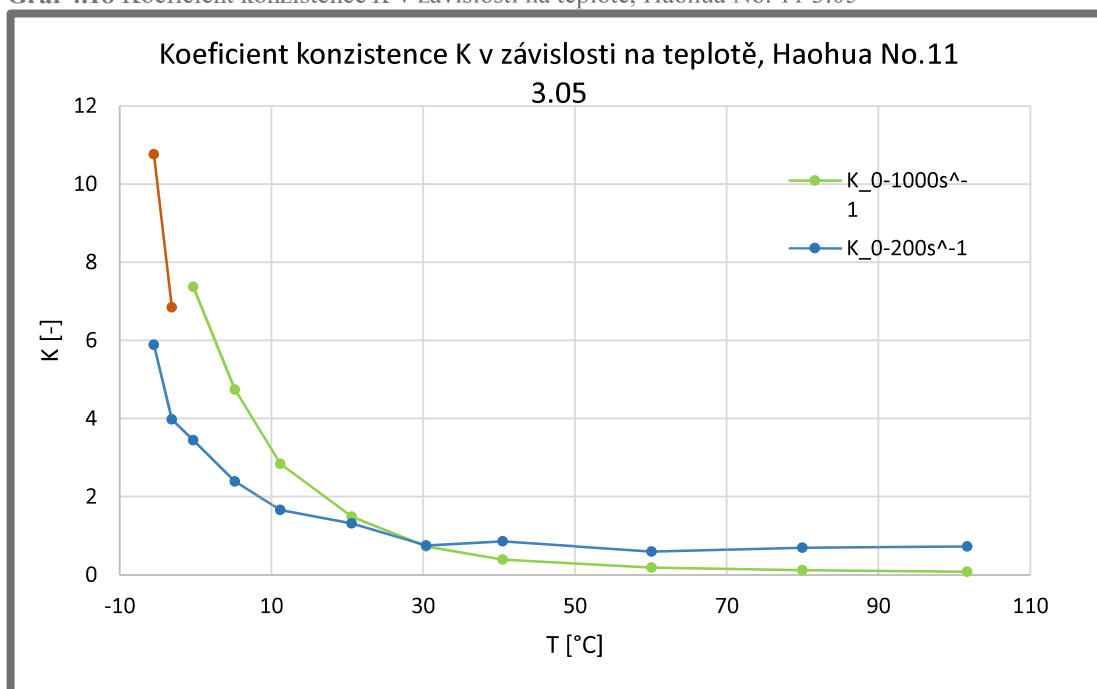
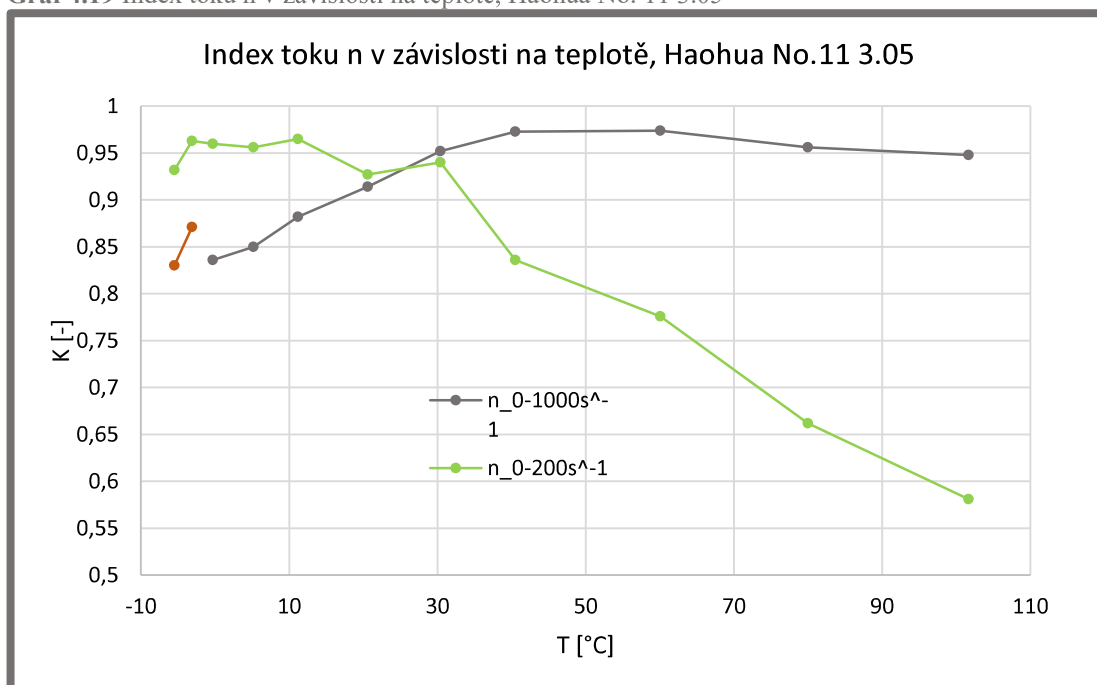
Graf 4.17 Index toku n v závislosti na teplotě, Haohua No. 10 2.55

4.3.2 Koeficient konzistence a index toku Haohua No. 11 3.05

4.3.2

Tab. 4.6 Koeficient konzistence a index toku dle Herschel-Bulkleyho modelu kapaliny Haohua No. 11 3.05

	$K_{0-1000s^{-1}}[-]$	$n_{0-1000s^{-1}}[-]$	$K_{0-200s^{-1}}[-]$	$n_{0-200s^{-1}}[-]$
-5,5°C	10,76 (0--600s ⁻¹)	0,830 (0--600s ⁻¹)	5,891	0,932
-3,1°C	6,843 (0--600s ⁻¹)	0,871 (0--600s ⁻¹)	3,977	0,963
-0,3°C	7,370	0,836	3,445	0,960
5,2°C	4,739	0,850	2,386	0,956
11,2°C	2,843	0,882	1,660	0,965
20,6°C	1,490	0,914	1,313	0,927
30,4°C	0,726	0,952	0,748	0,940
40,5°C	0,394	0,973	0,859	0,836
60,1°C	0,185	0,974	0,591	0,776
80°C	0,118	0,956	0,690	0,662
101,7°C	0,077	0,948	0,723	0,581

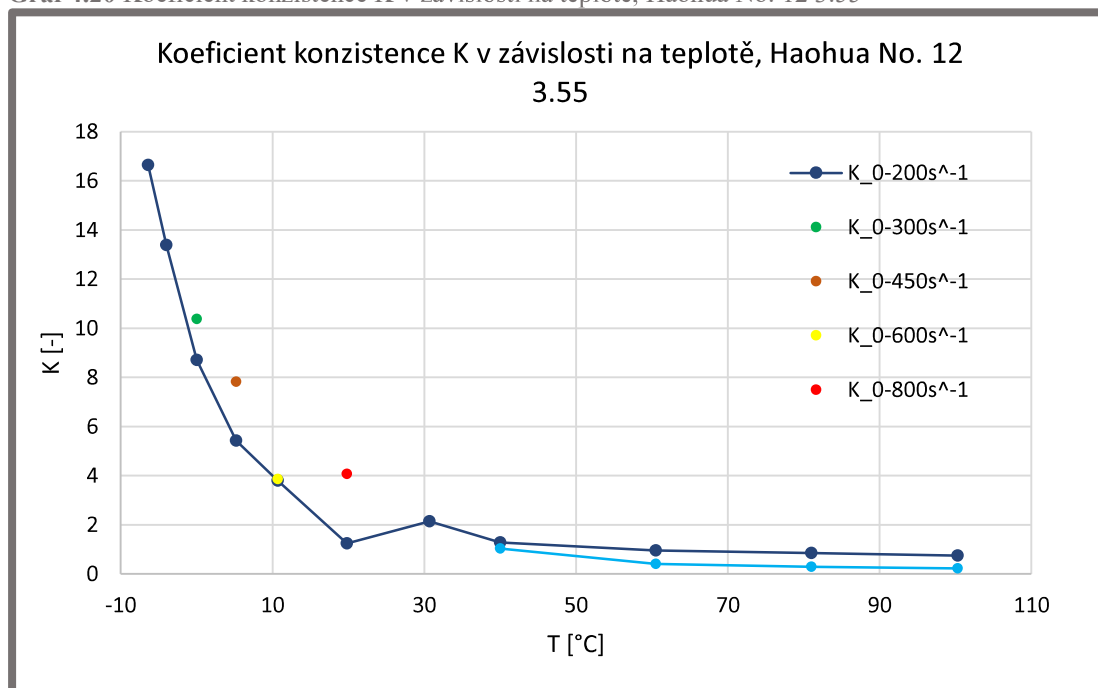
Graf 4.18 Koeficient konzistence K v závislosti na teplotě, Haohua No. 11 3.05Graf 4.19 Index toku n v závislosti na teplotě, Haohua No. 11 3.05

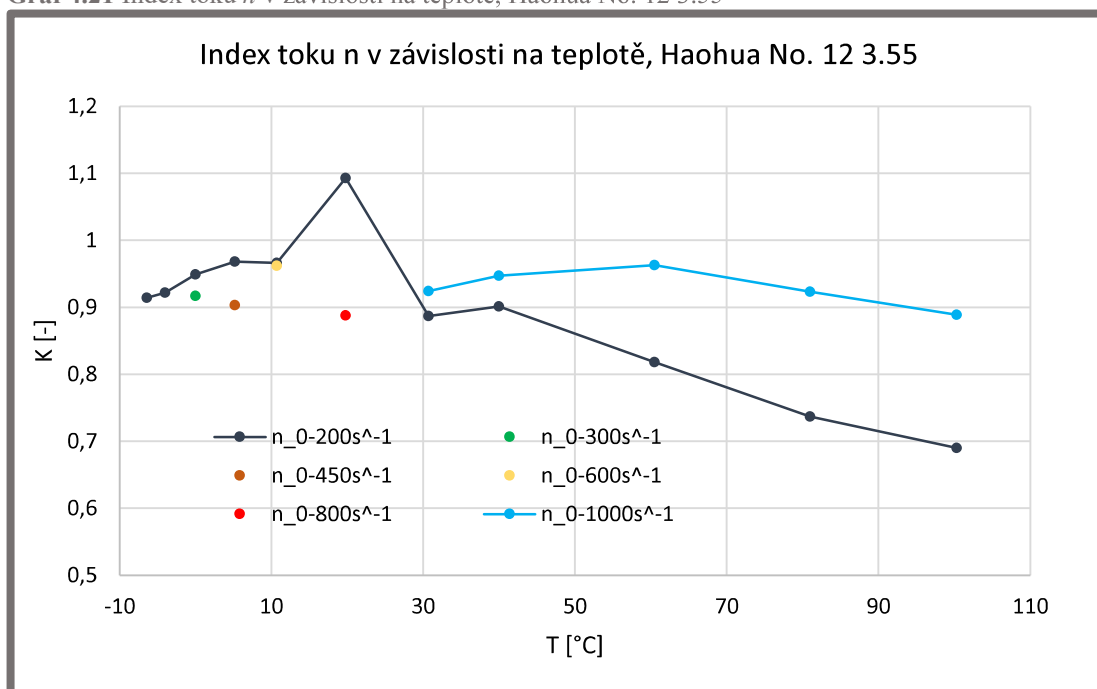
4.3.3 Koeficient konzistence a index toku Haohua No. 12 3.55

Tab. 4.7 Koeficient konzistence a index toku dle Herschel-Bulkleyho modelu kapaliny Haohua No. 12 3.55

	$K_{0-1000s^{-1}}[-]$	$n_{0-1000s^{-1}}[-]$	$K_{0-200s^{-1}}[-]$	$n_{0-200s^{-1}}[-]$
-6,4°C			16,65	0,914
-4°C			13,38	0,922
-0°C	10,38 (0--300s ⁻¹)	0,917 (0--300s ⁻¹)	8,703	0,949
5,2°C	7,827 (0--450s ⁻¹)	0,903 (0--450s ⁻¹)	5,424	0,968
10,7°C	3,863 (0--600s ⁻¹)	0,962 (0--600s ⁻¹)	3,792	0,966
19,8°C	4,064 (0--800s ⁻¹)	0,888 (0--800s ⁻¹)	1,237	1,093
30,7°C	1,816	0,924	2,143	0,887
40°C	1,038	0,947	1,280	0,901
60,5°C	0,411	0,963	0,961	0,818
81°C	0,287	0,923	0,858	0,737
100,3°C	0,223	0,889	0,744	0,690

Graf 4.20 Koeficient konzistence K v závislosti na teplotě, Haohua No. 12 3.55



Graf 4.21 Index toku n v závislosti na teplotě, Haohua No. 12 3.55

4.4 Sweep test, tixotropní smyčka

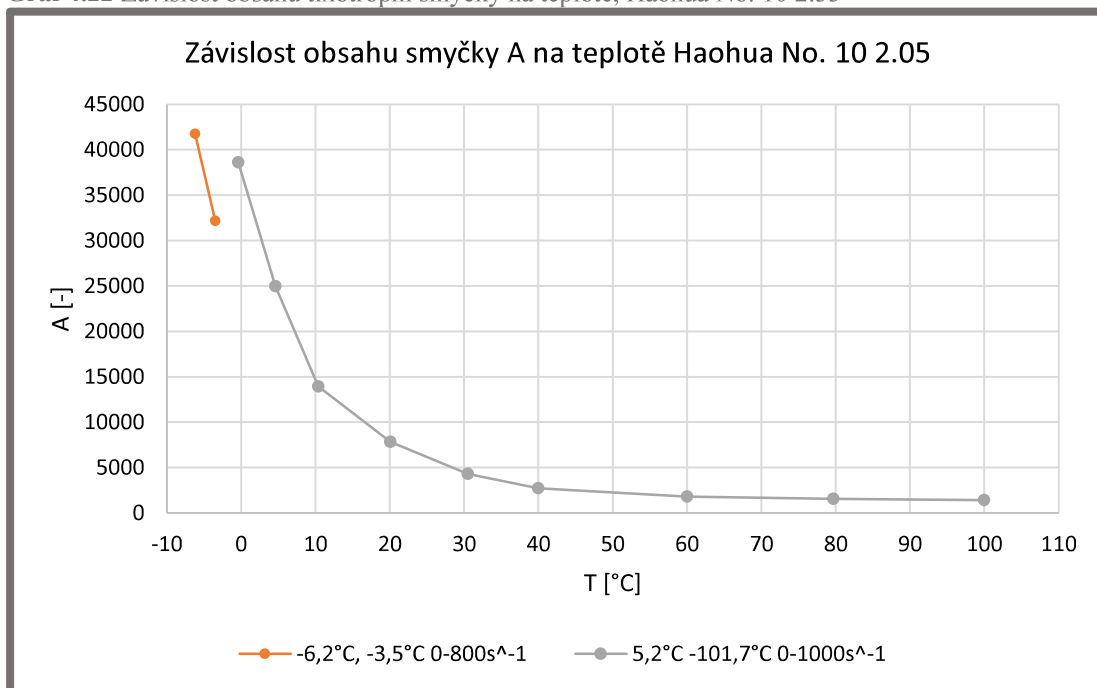
Při určování míry tixotropie vycházíme z dat získaných z měření smyčky 0-1000-0 s⁻¹. Metoda vyhodnocení je popsána v kapitole 3.3.4.

4.4.1 Sweep test, tixotropní smyčka, Haohua No. 10 2.55

Tab. 4.8 Hodnoty obsahu tixotropní smyčky, Haohua No. 10 2.55

A [-]	T [°C]
41751,2 (0-800s ⁻¹)	-6,2
32142,84 (0-800s ⁻¹)	-3,5
38600,15	-0,4
24954,11	4,6
13943,44	10,4
7838,904	20,1
4313,721	30,5
2703,534	40
1812,798	60
1540,281	79,7
1417,844	100

Graf 4.22 Závislost obsahu tixotropní smyčky na teplotě, Haohua No. 10 2.55



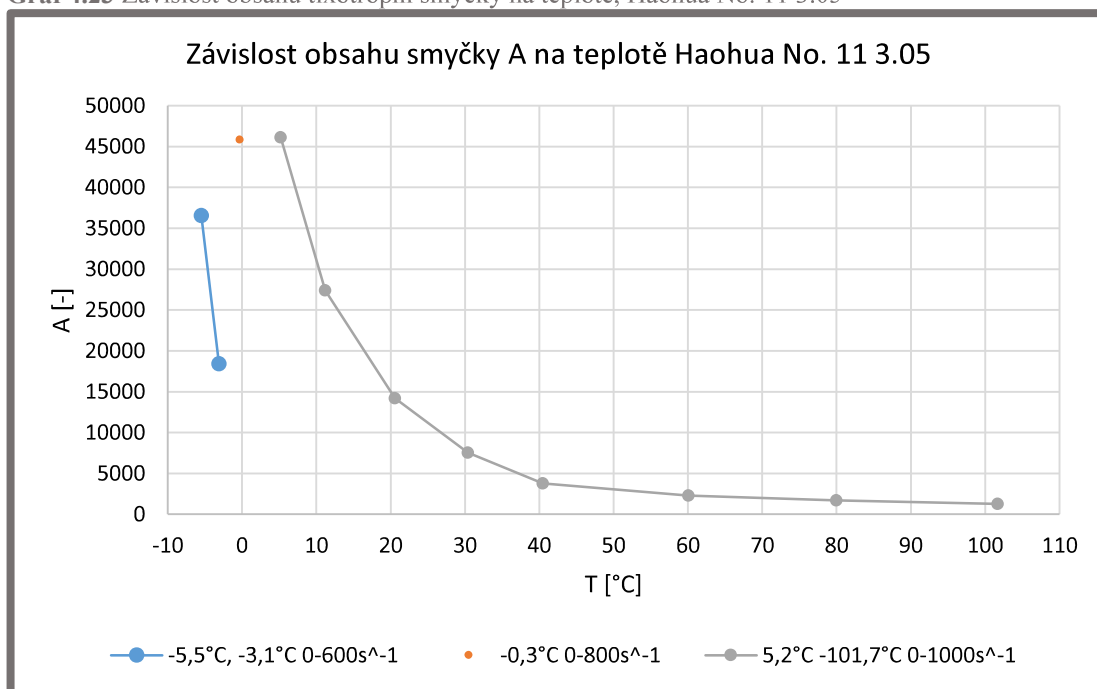
4.4.2

4.4.2 Sweep test, tixotropní smyčka, Haohua No. 11 3.05

Tab. 4.9 Hodnoty obsahu tixotropní smyčky, Haohua No. 11 3.05

A [-]	T [°C]
36560,44 (0-600s ⁻¹)	-5,5
18427,29 (0-600s ⁻¹)	-3,1
45852,96 (0-800s ⁻¹)	-0,3
46104,02	5,2
27416,39	11,2
14188,57	20,6
7522,817	30,4
3773,298	40,5
2286,753	60,1
1687,618	80
1261,255	101,7

Graf 4.23 Závislost obsahu tixotropní smyčky na teplotě, Haohua No. 11 3.05



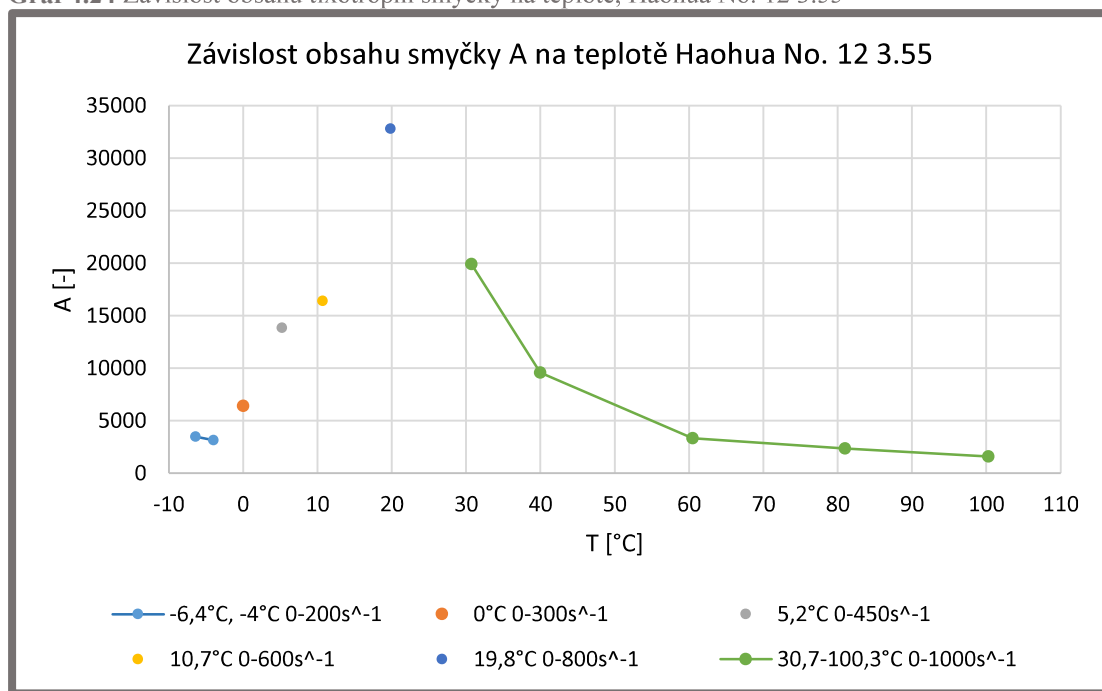
4.4.3 Sweep test, tixotropní smyčka, Haohua No. 12 3.55

4.4.3

Tab. 4.10 Hodnoty obsahu tixotropní smyčky, Haohua No. 12 3.55

A [-]	T [°C]
3485,314 (0-200s ⁻¹)	-6,4
3136,681 (0-200s ⁻¹)	-4
6416,591 (0-300s ⁻¹)	0
13857,07 (0-450s ⁻¹)	5,2
16417,3 (0-600s ⁻¹)	10,7
32805,72 (0-800s ⁻¹)	19,8
19917,6	30,7
9578,432	40
3323,193	60,5
2361,589	81
1591,487	100,3

Graf 4.24 Závislost obsahu tixotropní smyčky na teplotě, Haohua No. 12 3.55



5 DISKUZE

5.1

5.1 Mez toku

Bylo zjištěno, že na mez toku měřených MR kapalin v neaktivovaném stavu má vliv teplota a obsah částic. MR kapalina s vyšším obsahem částic (Haohua No. 12 3.55) má výrazně vyšší mez toku. Se snižující teplotou roste mez toku. Z trendu se vymyká jediné část s teplotou nižší než 0°C u kapaliny Haohua No. 12 3.55, kde pravděpodobně viskozita stoupla na tolik, že v průběhu 10s pauzy před testem se mikrostruktura nedokázala dostatečně zotavit. (Graf 4.4). Nejvyšší hodnota meze toku byla naměřena při MR kapalině Haohua No. 12 3.55 $\tau_0 = 12,64$ Pa. Pro porovnání mez toku kečupu je $\tau_0 = 24.3$ Pa [16].

5.2

5.2 CR test

Byly změřeny hodnoty dynamické viskozity pro teploty v rozsahu od -6°C do 100°C a pro smykové spády 150s^{-1} , 400s^{-1} , 800s^{-1} . V některých případech viskozita stoupla na tolik, že byl dosažený maximální moment, který dokáže vyvinout reometr, v tomhle případě byl smykový spád snížen na maximální nižší hodnotu. V případech nízkých teplot a vysokých smykových spádů, kdy vznikalo velké smykové napětí, docházelo pravděpodobně k ohřevu kapaliny o stěny měřícího tělesa a klesání viskozity v čase (Graf. 4.5, 4.6, 4.9, 4.10, 4.13, 4.14). V případě geometrie měřících těles koncentrické válce může docházet taktéž k odstředování částic a poklesu viskozity, ale to není tenhle případ, protože k odstředování částic by docházelo pravděpodobně při vyšších teplotách, kdy je viskozita nosné kapaliny poměrně nízká. Výrobce udává viskozitu při teplotě 40°C a smykovém spádu 1000s^{-1} pro kapaliny Haohua $\eta_{\text{No.10}} = 0,243$ Pa.s, $\eta_{\text{No.11}} = 0,383$ Pa.s, $\eta_{\text{No.12}} = 0,688$ Pa.s. V našem případě byli hodnoty naměřené při stejné teplotě a při smykovém spádu 800s^{-1} $\eta_{\text{No.10}} = 0,223$ Pa.s, $\eta_{\text{No.11}} = 0,339$ Pa.s, $\eta_{\text{No.12}} = 0,748$ Pa.s, což představuje rozdíl kolem 10%. Největší rozdíly v dynamické viskozitě při dané teplotě a různých smykových spádech jsou:

Haohua No. 10 2.55 při -6,2°C $\eta_{150\text{s}^{-1}} - \eta_{600\text{s}^{-1}} = 0,503$ Pa.s,

Haohua No. 11 3.05 při -3,1°C $\eta_{150\text{s}^{-1}} - \eta_{600\text{s}^{-1}} = 0,760$ Pa.s,

Haohua No. 12 3.55 při 10,7°C $\eta_{150\text{s}^{-1}} - \eta_{600\text{s}^{-1}} = 0,635$ Pa.s.

5.3

5.3 Sweep test, index toku a koeficient konzistence

Naměřené data byli proloženy dle Herschel-Bulkleyho modelu (Rovnice 4.) pro zjištění koeficientu konzistence K a indexu toku n . Naměřené data byli proloženy zvlášť pro rozsah smykového spádu $0-200\text{s}^{-1}$ a pro $0-1000\text{s}^{-1}$ (nebo max.), a to z důvodu, že v případě vyšších smykových spádů může měření ovlivnit výše zmíněné zahřívání. Zahřívání se nevyskytuje u žádné kapaliny ani teploty při smykovém spádu 200s^{-1} . Ze zjištěných dat vyplývá, že koeficient konzistence K klesá se zvyšující se teplotou a klesá též index toku n (při smykovém spádu $0-200\text{s}^{-1}$) (Graf 16, 17, 18, 19, 20, 21) které se liší od dat získaných v celém rozsahu smykového spádu $0-1000\text{s}^{-1}$. Zdá se, že se zvyšující teplotou roste smykové řádnutí kapaliny, ale měření je ovlivněno mnoha faktory a naměřené data nejsou ucelená. V budoucnu bude potřebné zlepšit metodiku měření.

5.4 Sweep test, tixotropní smyčka

5.4

Naměřené data byli změřeny a vyhodnoceny ve výpočetním programu Matlab. Z vyhodnocených dat můžeme vidět, že velikost obsahu smyčky se výrazně zvětšuje s klesající teplotou. Naměřené data mohou být výrazně ovlivněna výše zmíněným zahříváním.

Cílem závěrečné práce bylo určení metodiky měření a vyhodnocení reologických vlastností MR kapalin. Poznatky o vhodnosti a nevhodnosti použité metodiky budou dále použity pro měření dalších MR kapalin. Většina měření podala hodnotné výsledky pro popis chování MR kapalin v různých tokových podmínkách, které najdou uplatnění při konstrukci MR zařízení. Určování meze toku při různých teplotách podalo zajímavé výsledky. Nejvyšších hodnot mez toku dosahovala MR kapalina s nejvyšším obsahem tuhých částic (Haohua 3.55) a to 12,67 Pa při 5,2°C, naopak nejnižších téměř nulových hodnot při vyšších teplotách dosahovala MR kapalina s nejnižším obsahem částic (Haohua No. 10 2.55). Pro budoucnosti by bylo vhodné určit exaktnější metodu pro vyhodnocení. Při určování dynamické viskozity při konstantním smykovém spádu (CR test) bylo zjištěno, že při vyšších smykových spádech dochází k snižování dynamické viskozity způsobené zahříváním měřicího tělíska. Tento jev negativně ovlivnil i měření tixotropie, indexu toku, a koeficientu konzistence. V budoucnosti by bylo vhodné pro měření při vyšších smykových spádech použít vhodnější geometrii měřících těles, například lopatky-válec nebo disk-disk se zoubkovaným povrchem. Určování indexu toku a koeficientu konzistence podalo zajímavé výsledky ohledem smykového řídnutí testovaných MR kapalin. Výrazné smykové řídnutí projevovali všechny měřené MR kapaliny při vysokých teplotách (index toku $n=0,690$, Haohua No. 12 3.55 100°C), přičemž za relevantní výsledky jsou považovány hodnoty při rozsahu smykového spádu 0-200 s⁻¹, který není negativně ovlivněn zahříváním měřicího tělíska. Určování tixotropie bylo při některých teplotách negativně ovlivněno zahříváním měřicího tělíska. Pro budoucnost by bylo vhodné použít pro určení tixotropie exaktnějších metod se zahrnutím závislosti míry tixotropie na době relaxace (creep test). Při použití metody pomocí tixotropní smyčky by bylo vhodné provést měření v nižším rozsahu smykového spádu, protože mechanismy způsobující tixotropní chování jsou výrazné hlavně při nízkých smykových spádech.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] RABINOW, J. Magnetic fluid torque and force transmitting device US Patent Specification 2575360. 1951.
- [2] DE VICENTE, Juan; KLINGENBERG, Daniel J.; HIDALGO-ALVAREZ, Roque. Magnetorheological fluids: a review. *Soft Matter*, 2011, 7.8: 3701-3710.
- [3] GENÇ, Seval. *Synthesis and properties of magnetorheological (MR) fluids*. 2002. PhD Thesis. University of Pittsburgh.
- [4] JOLLY, Mark R.; BENDER, Jonathan W.; CARLSON, J. David. Properties and applications of commercial magnetorheological fluids. In: *5th annual international symposium on smart structures and materials*. International Society for Optics and Photonics, 1998. p. 262-275.
- [5] WERELEY, N. M., et al. Bidisperse magnetorheological fluids using Fe particles at nanometer and micron scale. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2006, 17.5: 393-401.
- [6] (12) MONTANARI, Alberto, et al. "Panta Rhei—everything flows": change in hydrology and society—the IAHS scientific decade 2013–2022. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, 58.6: 1256-1275.
- [7] KORDONSKI, W.; GORODKIN, S.; ZHURAVSKI, N. Static yield stress in magnetorheological fluid. *International journal of modern physics B*, 2001, 15.06n07: 1078-1084.
- [8] GENC, Seval; PHULÉ, Pradeep P. Rheological properties of magnetorheological fluids. *Smart Materials and Structures*, 2002, 11.1: 140.
- [9] BONNECAZE, R. T.; BRADY, J. F. Yield stresses in electrorheological fluids. *Journal of Rheology (1978-present)*, 1992, 36.1: 73-115.
- [10] ZHANG, J. Q.; ZHANG, J.; JING, Q. Effect of seven different additives on the properties of MR fluids. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2009. p. 012086.
- [11] BARNES, Howard A. Thixotropy—a review. *Journal of Non-Newtonian fluid mechanics*, 1997, 70.1: 1-33.
- [12] WEISS, Keith D., et al. *Thixotropic magnetorheological materials*. U.S. Patent No 5,645,752, 1997.
- [13] GUAN, X. C., et al. Research on the evaluation methods of thixotropy of MR Fluid. *Pacific Sci. Rev.*, 2009, 11.
- [14] MEZGER, Thomas G. *The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers*. Vincentz Network GmbH & Co KG, 2006.
- [15] GONCALVES, Fernando D.; AHMADIAN, M.; CARLSON, J. D. Behavior of MR fluids at high velocities and high shear rates. *International Journal of Modern Physics B*, 2005, 19.07n09: 1395-1401.
- [16] CMAJDÁLKOVÁ, Miroslava. *Sestavení reologického profilu kečupu*. Brno, 2010. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně Agronomická fakulta Ústav techniky a automobilové dopravy. Vedoucí práce Doc. Ing. Libor Severa, Ph.D.
- [17] *Obrázek řetezení částic v MR kapalině* [online]. 2003 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.simpartix.com/case-studies/magnetorheology>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

MR	Magnetoreologické
PAO	Polyalfaolefin
K [-]	Koeficient konzistence Herschel-Bukleyho rovnice
n [-]	Index toku Herschel- Bukleyho rovnice
t [s]	Čas
T [°C]	Teplota
A [Pa/Nm], M [$\frac{s^{-1}}{rad.s^{-1}}$]	Výpočetní faktory měřícího tělesa
M _d [N. m]	Krouticí moment
Ω [s ⁻¹]	Uhlová rychlost
X [-], Y[-]	Koeficienty Reynoldsovy rovnice
τ [Pa]	Smykové napětí
γ̇ [s ⁻¹]	Smykový spád
η [Pa.s]	Dynamická viskozita
η _a [Pa.s]	Zdánlivá viskozita
η ₀ [Pa.s]	Plastická viskozita
τ ₀ [Pa]	Mez toku

SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Obrázky:

- Obr. 1.3 Diagram definice Newtonovho zákona
Obr. 1.4 Ne-newtonovské kapaliny [14]
Obr. 1.3 Reogram tixotropní a reopexní kapaliny
Obr. 1.4 a) neaktivovaný stav b) aktivovaný stav [17]
Obr. 1.5 Ilustrace Binghamůvho a Herschel Bulkleyho modelu
Obr. 1.6 Diagram popisující běžnou kapalinu vykazující různé meze toku [4]
Obr. 1.7 Změna mikrostruktury kapaliny během zatěžování a relaxace [11]
Obr. 1.8 Diagram závislosti smykového spádu na čase při měření tixotropní smyčky.
Obr. 1.9 Ilustrace smykově řídnoucího chování
Obr. 3.1 Experimentální aparatura
Obr. 3.2 Experimentální aparatura
Obr. 3.3 Geometrie měřicího tělesa Z20 DIN
Obr. 3.4 Proložení experimentálních dat Binghamovým modelem
Obr. 3.5 Vzorek připravený na měření

Tabulky:

- Tab. 3.1 Vzorky měřených MR kapalin, údaje výrobce.
Tab. 4.1 Přehled hodnot meze toku kapalin Haohua No. 10 2.55 , No. 11 3.05 ,No.12 3.55
Tab 4.2 Přehled výsledků CR testů Haohua 2.55 No. 10
Tab 4.3 Přehled výsledků CR testů Haohua 3.05 No. 11
Tab 4.4 Přehled výsledků CR testů Haohua 3.55 No. 12
Tab. 4.5 Koeficient konzistence a index toku dle Herschel-Bulkleyho modelu kapaliny Haohua No. 12 3.55
Tab. 4.6 Koeficient konzistence a index toku dle Herschel-Bulkleyho modelu kapaliny Haohua No. 11 3.05
Tab. 4.7 Koeficient konzistence a index toku dle Herschel-Bulkleyho modelu kapaliny Haohua No. 12 3.55
Tab. 4.8 Hodnoty obsahu tixotropní smyčky, Haohua No. 10 2.55
Tab. 4.9 Hodnoty obsahu tixotropní smyčky, Haohua No. 11 3.05
Tab. 4.10 Hodnoty obsahu tixotropní smyčky, Haohua No. 12 3.55

Grafy :

- Graf 4.1 Tokové křivky pro různé teploty pro zjištění meze toku, Haohua No. 10 2.55
Graf 4.2 Tokové křivky pro různé teploty pro zjištění meze toku, Haohua No. 11 3.05
Graf 4.3 Tokové křivky pro různé teploty pro zjištění meze toku, Haohua No. 12 3.55
Graf 4.4 Porovnání hodnot mezi toku kapalin Haohua No. 10 2.55, No. 11 3.05, No. 12 3.55
Graf 4.5 CR test Haohua 2.55 No. 10, $150s^{-1}$

Graf 4.6 CR test Haohua 2.55 No. 10, 400s^{-1}

Graf 4.7 Dynamická viskozita v závislosti na teplotě pro různé smykové spády Haohua No. 10 2.55

Graf 4.8 CR test Haohua 3.05 No. 11, 150s^{-1}

Graf 4.9 CR test Haohua 3.05 No. 11, 400s^{-1}

Graf 4.10 CR test Haohua 3.05 No. 11, 600s^{-1} , 800s^{-1}

Graf 4.11 Dynamická viskozita v závislosti na teplotě pro různé smykové spády, Haohua No.11 3.05

Graf 4.12 CR test Haohua 3.55 No. 12, 400s^{-1} , 150s^{-1}

Graf 4.13 CR test Haohua 3.55 No. 11, 400s^{-1}

Graf 4.14 CR test Haohua 3.55 No. 12, 600s^{-1} , 800s^{-1}

Graf 4.15 Dynamická viskozita v závislosti na teplotě pro různé smykové spády, Haohua No. 12 3.55

Graf 4.16 Koeficient konzistence K v závislosti na teplotě, Haohua No. 10 2.55

Graf 4.17 Index toku n v závislosti na teplotě, Haohua No. 10 2.55

Graf 4.18 Koeficient konzistence K v závislosti na teplotě, Haohua No. 11 3.05

Graf 4.19 Index toku n v závislosti na teplotě, Haohua No. 11 3.05

Graf 4.20 Koeficient konzistence K v závislosti na teplotě, Haohua No. 12 3.55

Graf 4.21 Index toku n v závislosti na teplotě, Haohua No. 12 3.55

Graf 4.22 Závislost obsahu tixotropní smyčky na teplotě, Haohua No. 10 2.55

Graf 4.23 Závislost obsahu tixotropní smyčky na teplotě, Haohua No. 11 3.05

Graf 4.24 Závislost obsahu tixotropní smyčky na teplotě, Haohua No. 12 3.55

SLOVNÍK POJMŮ

1.) Karbonylové železo

Karbonylové železo je vysoko čisté (až 99,5%) železo, připravené chemickým rozkladem pentakarbonyl železa. Jeho běžný vzhled je šedý prášek složený ze sférických mikročástic. Prášek karbonylového železa byl vynalezen společností BASF v roce 1925

1.) Suspenze

Je heterogenní směs, např. jemně dispergované (rozptýlené) pevné látky v kapalině. Důležitým znakem suspenze je, že dochází k samovolnému, ale pomalému oddělení složek směsi (např. sedimentací), na rozdíl od roztoku kde nikdy nedojde k oddělení jednotlivých složek.

2.) Koloid

Je látku, která tvoří heterogenní disperzní soustavu obsahující částice o velikosti 1nm až 1000nm. Koloidy jsou charakteristické tím, že tvoří gely

3.) Gel

Gel je koloidní systém, ve kterém porézní síť vzájemně spojených nanočástic zachytí určitý objem tekutiny. Váhou a objemem se gely podobají kapalinám a tím též vykazují hustotu podobnou kapalinám, i když mají soudržnost struktury pevných látek. Mnoho gelů vykazuje tixotropii.

4.) Oligomer

Je molekulární komplex, který se na rozdíl od polymerů skládá ze z pár monomerů . Například mnoho olejů jsou oligomery.

PŘÍLOHY

CD nosič obsahující experimentální data v souborech formátu .xlsx